

Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio en Ciencias Agropecuarias
Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte
Maestría en Ciencias Agropecuarias



TESIS:

*PLANEACIÓN DEL RIEGO DE MAÍZ EN DOS ESCENARIOS DE DISPONIBILIDAD HÍDRICA
EN ZONAS DE RIEGO, USANDO AQUACROP*

**Que para obtener el grado de maestría en Ciencias
Agropecuarias**

PRESENTA:

GERSON ABRAHAM GAXIOLA AGUIAR

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ERNESTO SIFUENTES IBARRA

Culiacán, Sinaloa, México; a septiembre de 2025



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada etapa de este camino.

Agradezco de manera muy especial a mi director de tesis, el Dr. Ernesto Sifuentes Ibarra, por su paciencia, orientación y confianza en mi trabajo. Su experiencia y compromiso académico fueron fundamentales para la realización de este proyecto.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mis asesores: la MC. Mariana de Jesús Marcial Pablo, el MC. Vladimir Ruíz Pérez, el Dr. Ronald E. Ontiveros Capurata y el Dr. Quintín Armando Ayala Armenta, por su valiosa colaboración, aportes técnicos y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las instituciones que formaron parte de este proceso y contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis.

Gracias al Colegio en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de crecer académica y personalmente.

En especial, agradezco al CENID-RASPA INIFAP y al Campo Experimental Valle del Fuerte, por haberme brindado la oportunidad de colaborar y desarrollarme dentro del proyecto "Huella hídrica de cultivos usando sensores remotos y datos de reanálisis, una aproximación a escala parcelaria", financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación(SECIHTI) .

A mis amistades, gracias por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por estar presentes en los momentos importantes. Su compañía ha sido un impulso constante para seguir adelante.

A todos los que, de alguna forma, formaron parte de este proceso, les agradezco de corazón.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud a mis padres, por ser mi ejemplo de fortaleza, dedicación y amor incondicional. Gracias por su apoyo constante, por sus sacrificios y por enseñarme, con su vida, el valor del esfuerzo y la humildad. Este logro es tan mío como suyo.

A mis hermanos, por estar siempre a mi lado, por sus palabras de aliento, por su compañía en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño avance. Su presencia ha sido fundamental en este camino.

A ustedes, mi familia, les dedico este logro que nace del amor, la unión y el ejemplo que me han dado cada día.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. HIPÓTESIS	3
III. OBJETIVOS	4
3.1 Objetivo general	4
3.2 Objetivos específicos.....	4
IV. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	5
4.1 Importancia del riego en el rendimiento de los cultivos	5
4.2 Efecto del agua en el crecimiento y desarrollo del maíz.....	5

4.3	El cambio climático y su impacto en la agricultura.....	7
4.3.1	Acciones de adaptación	8
4.4	Manejo de sequías en la agricultura	9
4.4.1	Clasificación de sequías	9
4.4.2	La sequía en México	10
4.5	Modelos de simulación de rendimientos.....	11
4.5.1	El modelo AquaCrop.....	13
4.5.2	Calibración y Validación.....	16
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	17
5.1	Descripción de la zona de estudio	17
5.2	Calibración y validación del modelo AquaCrop	19
5.2.1	Calibración	19
5.2.2	Validación	25
5.2.3	Generación de recomendaciones.....	26
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
6.1	Modelo AquaCrop calibrado.....	27
6.2	Validación del modelo.....	31
6.3	Modelación de fechas de siembra y requerimientos hídricos en escenarios climáticos y edáficos.....	33
6.3.1	Recomendaciones para la planeación del riego en escenarios climáticos y edáficos.....	42

6.3.1.1	Disponibilidad hídrica normal.....	42
6.3.1.2	Disponibilidad hídrica restringida tres auxilios (sequía)	44
6.3.1.3	Disponibilidad hídrica restringida con dos auxilios (sequía)	45
VII.	CONCLUSIONES.....	47
VIII.	LITERATURA CITADA	48
IX.	ANEXOS	52

ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1. Características generales de los modelos de simulación de rendimiento en los últimos 30 años.	12
Cuadro 2. Valores de Temperaturas (mínimas, máximas y medias) y precipitaciones del periodo octubre-abril de los últimos cuatro ciclos agrícolas otoño-invierno, en el norte de Sinaloa	18
Cuadro 3. Parcelas experimentales utilizadas en la calibración del modelo AquaCrop.	19
Cuadro 4. Parcelas experimentales utilizadas en la validación del modelo AquaCrop.	25
Cuadro 5. Resultados de la actualización de la calibración de los parámetros del modelo AquaCrop para el cultivo de maíz durante el ciclo OI 2022-2023 en el norte de Sinaloa.	27
Cuadro 6. Riego para la planeación de fecha de siembra optima en disponibilidad hídrica normal.	43
Cuadro 7. Recomendaciones para la planeación de fecha de siembra optima en tres tipos de textura y tres tipos de ciclos agrícolas OI.	43
Cuadro 8. Riego para la planeación de fecha de siembra optima en disponibilidad hídrica restringida.	44
Cuadro 9. Recomendaciones para la planeación del suelo en tres tipos de textura y tres tipos de ciclos agrícolas OI.	44
Cuadro 10. Riego para la planeación de fecha de siembra optima en disponibilidad hídrica restringida.	45
Cuadro 11. Recomendaciones para la planeación del suelo en tres tipos de textura y tres tipos de ciclos agrícolas OI.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Funciones lineales de producción del agua para el maíz, (steduto et al., 2012).	7
figura 2. Estado de la sequía de México del 2023 (https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico).....	11
figura 3. Ubicación de la zona de estudio.....	17
figura 4. Tipos de suelo que predominan en la zona de estudio valle del fuerte(https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/25/25011)	19
figura 5. Interfaz principal de la versión 7.1 del modelo aquacrop (https://www.fao.org/aquacrop/software/es ,).....	21
figura 6. Ventana del apartado clima de la versión 7.1 del modelo aquacrop, ((https://www.fao.org/aquacrop/software/es ,).....	21
figura 7. Ventanilla del apartado suelo de la versión 7.1 del modelo aquacrop, (https://www.fao.org/aquacrop/software/es ,).....	22
figura 8. Ventanilla del apartado riegos de la versión 7.1 del modelo aquacrop. (https://www.fao.org/aquacrop/software/es ,).....	23
figura 9. Ventanilla del apartado parámetros del cultivo de la versión 7.1 del modelo aquacrop, ((https://www.fao.org/aquacrop/software/es ,).....	24
figura 10. Rendimiento medido comparado con el rendimiento estimado con aquacrop 7.1 en el ciclo oi 2022-2023 en dos condiciones hídricas.....	29
figura 11. Comparación de rendimiento de cuatro variedades de maíz con tres riegos de auxilioos en el ciclo oi 2022-2023. (tukey al 0.05).....	30
figura 12. Comparación de rendimiento de cuatro variedades de maíz con cuatro riegos de auxilioos en el ciclo oi 2022-2023. (tukey al 0.05).....	31

figura 13. Rendimiento medido comparado con el rendimiento estimado con aquacrop 7.1 en el ciclo oi 2023-2024 en dos condiciones hídricas.....	32
figura 14. Comparación de rendimiento de siete variedades de maiz con tres riegos de auxilios en el ciclo oi 2023-2024. (tukey al 0.05).....	33
figura 15. Comparación de rendimiento de siete variedades de maiz con tres riegos de auxilios en el ciclo oi 2023-2024. (tukey al 0.05).....	33
figura 16. Rendimiento simulado del cultivo de maíz en suelo arcilloso, para un ciclo neutro (a), frio (b) y caliente (c) y tres condiciones de riego: 4 auxilios (4a), 3 auxilios(3a) y 2 auxilios(2a).....	35
figura 17. Evapotranspiración simulada del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con tres tipos de ciclos oi (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4a), 3 auxilios(3a) y 2 auxilios (2a)).	37
figura 18. Rendimiento simulado del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con tres tipos de ciclos oi (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4a), 3 auxilios(3a) y 2 auxilios (2a)).	38
figura 19. Evapotranspiración simulada del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con tres tipos de ciclos oi (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4a), 3 auxilios(3a) y 2 auxilios (2a)).	40
figura 20. Rendimiento simulado del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con tres tipos de ciclos oi (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4a), 3 auxilios(3a) y 2 auxilios(2a)).	41
figura 21. Evapotranspiración simulada del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con tres tipos de ciclos oi (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4a), 3 auxilios(3a) y 2 auxilios (2a)).	42

RESUMEN

El maíz (*Zea mays L.*) es un cultivo emblemático de México debido a su gran relevancia social, cultural y económica. En este contexto, el estado de Sinaloa se posiciona como el principal productor de alimentos bajo condiciones de riego, con una cobertura del 93 % de la superficie total sembrada (753,000 ha). No obstante, la creciente incertidumbre en la disponibilidad de agua, causada por sequías recurrentes y la baja eficiencia en el uso del riego por gravedad, representa un desafío significativo para la sostenibilidad de la producción agrícola en la región. En este escenario, la simulación del crecimiento de cultivos y la predicción del rendimiento mediante herramientas como el modelo AquaCrop, desarrollado por la FAO, ofrece ventajas sustanciales. Este modelo se ha consolidado como una herramienta útil para la planeación y el monitoreo de los ciclos agrícolas, especialmente bajo condiciones variables de disponibilidad hídrica. El objetivo del presente trabajo fue generar recomendaciones agronómicas basadas en la disponibilidad de agua para distintas para el norte del estado de Sinaloa, utilizando el modelo AquaCrop aplicado al cultivo de maíz (*Zea mays L.*). La calibración del modelo se llevó a cabo en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP durante el ciclo otoño-invierno (O-I) 2022–2023, evaluando dos escenarios hídricos: disponibilidad normal y condiciones de sequía, ambos bajo riego por gravedad. Posteriormente, la validación del modelo se realizó en el ciclo O-I 2023–2024, replicando las mismas condiciones experimentales. Los resultados de la calibración y validación indicaron una alta precisión en la simulación del rendimiento del cultivo, lo que permitió establecer recomendaciones técnicas considerando tres niveles de disponibilidad hídrica (4, 3 y 2 auxilios), tres tipos de textura de suelo (arcillosa, franco arcilloso y franco limoso) y tres condiciones climáticas correspondientes a tipos de ciclos agrícolas OI: neutro, frío y caliente. A partir de esta información, se determinó el periodo óptimo de siembra para cada combinación de factores, brindando una base sólida para la toma de decisiones en el manejo del cultivo de maíz en Sinaloa bajo escenarios de variabilidad climática.

Palabras claves: Rendimiento, riego deficitario, requerimientos hídricos, manejo de sequías, planes de siembra.

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is an emblematic crop in Mexico due to its significant social, cultural, and economic importance. In this context, the state of Sinaloa stands out as the leading producer of food crops under irrigation conditions, covering 93% of the total cultivated area (753,000 ha). However, increasing uncertainty in water availability—caused by recurring droughts and the low efficiency of gravity irrigation—poses a major challenge to the sustainability of agricultural production in the region. In this scenario, crop growth simulation and yield prediction using tools such as the AquaCrop model, developed by the FAO, offer substantial advantages. This model has become a valuable tool for planning and monitoring agricultural cycles, especially under variable water availability conditions. The objective of this study was to generate agronomic recommendations based on water availability for different micro-regions of the state of Sinaloa, using the AquaCrop model applied to maize (*Zea mays* L.). The model was calibrated at the Valle del Fuerte Experimental Station (CEVAF) of INIFAP during the 2022–2023 fall-winter (F-W) cycle, evaluating two water scenarios: normal availability and drought conditions, both under gravity irrigation. Subsequently, the model was validated during the 2023–2024 F-W cycle, replicating the same experimental conditions. The calibration and validation results showed high accuracy in simulating crop yield, which allowed for the establishment of technical recommendations considering three levels of water availability (4, 3, and 2 irrigations), three soil textures (clay, clay loam, and silty loam), and three climate conditions corresponding to different agricultural cycle types: neutral, cold, and warm. Based on this information, the optimal sowing period was determined for each combination of factors, providing a solid foundation for decision-making in maize crop management in Sinaloa under climate variability scenarios.

Keywords: yield, deficit irrigation, water requirements, drought management, planting schedules.

I. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) es representativo de México por su importancia social, cultural y económica, la producción de maíz blanco tiene como destino principal el consumo humano, mientras que el maíz amarillo se destina a la industria o fabricación de alimentos pecuarios (ASERCA, 2018). La producción en México de este grano en 2023 fue de 24.32 millones de toneladas, obtenidas en una superficie sembrada de 6.6 millones de hectáreas, de estas solo el 17.76 % se cultivan en condiciones de riego, mientras que el 82.23% son de temporal. Los principales estados productores son, Sinaloa (22%), Jalisco (14%), Estado de México (8%), Michoacán (7%), Guanajuato (6%), Guerrero (5%), Veracruz (5%), Chiapas (5%), Chihuahua (4%), Puebla (4%) y el resto de los Estados representan el (20%) restante. (SIAP, 2024).

El estado de Sinaloa es el principal productor de alimentos, bajo condiciones de riego donde el 93% de la superficie se establece bajo este sistema. Sin embargo, cada vez es más frecuente la incertidumbre de la disponibilidad del agua debido a la sequía recurrente, sumado a la baja eficiencia de aplicación de riego, paquetes tecnológicos obsoletos, lo cual genera un escenario desalentador en la producción de este grano. Además de lo anterior, han reportado efectos como el cambio climático que agudizan el problema de escasez hídrica en cuencas hidrológicas y en las áreas de cultivo. La FAO (2019) reportó que el cambio climático y la variabilidad de las precipitaciones implica periodos de sequías, por lo cual es necesario una gestión adecuada de este recurso.

Ante esta situación, la agricultura requiere de alternativas que ayuden a prevenir pérdidas en la producción ante la escasez de agua y para ello se busca planificar y optimizar el manejo del agua de riego. Una herramienta son los modelos de simulación biológica que son recursos que integran información del cultivo, climatología, manejo y poder pronosticar el rendimiento de los cultivos, el uso de agua, así como la eficiencia en el uso de recursos agrícolas bajo distintos escenarios productivos. Existen distintos modelos que simulan el desarrollo del cultivo en diversos escenarios como: DSSAT, CERES, Cal-SIMETAW, EPIC&APEX, APSIM, CropSyst (Pawar et al., 2017). Otro modelo que ha ganado amplia aplicación en los últimos años es AquaCrop, el cual

emplea un número reducido de parámetros y variables que pueden determinarse mediante métodos sencillos, en comparación con otros modelos similares. Este modelo ha demostrado alta exactitud entre los valores simulados y observados en los cultivos de soya y girasol para diferentes épocas de siembra y regímenes hídricos (Abi *et al.*, 2015). González *et al.* (2018) obtuvieron buenos resultados en la capacidad predictiva del modelo bajo la condición de estrés hídrico en el cultivo de sorgo en suelo Ferralítico Rojo. También se reportan resultados de Ramos *et al.*, (2016) al evaluar el cultivo de maíz donde presentó entre lo simulado y lo real superior al 90% generando de esta manera un patrón de confiabilidad en la toma de decisiones referidas a maximizar los rendimientos.

En la región de Sinaloa, existen pocos estudios que utilicen AquaCrop de forma experimental para el cultivo de maíz. Ante el cambio climático y la limitada disponibilidad de recursos para investigación, es indispensable contar con una herramienta robusta que permita simular y calibrar el modelo para evaluar cultivos bajo condiciones de sequía. AquaCrop facilita la estimación del crecimiento del cultivo y el pronóstico del rendimiento, lo que lo posiciona como una valiosa herramienta de planeación y seguimiento del ciclo agrícola en distintos escenarios de disponibilidad hídrica y disponer de este tipo de modelo calibrado y validado localmente permitirá mejorar los procesos de decisión en microrregiones, diseñar calendarios de riego ajustados a escenarios normales o de sequía, reducir el consumo de agua sin sacrificar rendimiento y contar con una herramienta eficaz de gestión hídrica adaptada al contexto regional.

II. HIPÓTESIS

El modelo AquaCrop calibrado y validado experimentalmente en el norte de Sinaloa, México, permitirá la planeación de calendarios de riego con escenarios de disponibilidad hídrica normal y sequía en las diferentes microrregiones de la zona.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Generar calendarios de riego óptimos para una zona de riego, para su implementación en escenarios de disponibilidad hídrica normal y de sequía

3.2 Objetivos específicos

1. Calibrar el modelo AquaCrop para condiciones de disponibilidad hídrica normal y de sequía en una zona representativa del norte de Sinaloa.
2. Validar el modelo AquaCrop para su aplicación en condiciones de disponibilidad hídrica normal y de sequía en una zona representativa del norte de Sinaloa.
3. Generar recomendaciones de requerimientos hídricos y del manejo riego del maíz en dos escenarios de disponibilidad hídrica normal y de sequía.

IV. ANTECEDENTES TEÓRICOS

4.1 Importancia del riego en el rendimiento de los cultivos

La mayor parte del material vegetal de las plantas está constituida por agua, la cual se encuentra distribuida en diferentes proporciones según la actividad metabólica de cada una de sus partes. En cultivos herbáceos, los tejidos vegetales pueden alcanzar contenidos de agua entre el 80 y el 95%. En contraste, los granos, las maderas y las semillas de oleaginosas presentan una actividad metabólica menos intensa, por lo que contienen una menor proporción de agua (Alcántar et al., 2016).

El estrés hídrico se presenta ante la ausencia de lluvia y riego, y cuando el agua almacenada en el suelo se agota al punto que las raíces se les dificulta la absorción, afectando procesos fisiológicos de la planta. Un estrés por más mínimo que este se presente puede ocasionar en la parte del desarrollo vegetativa un menor crecimiento en la cobertura del dosel, si el nivel de estrés se vuelve severo podría llegar a provocar a reducir la resistencia estomática, y las hojas viejas aceleran la senescencia. En la parte reproductiva por ende se reduce la producción de biomasa disminuyendo el rendimiento del grano, esto se debe a la polinización fallida por no estar en intervalos de tiempo correctos. El maíz de manera general es sensible al estrés hídrico. (Steduto et al., 2012).

4.2 Efecto del agua en el crecimiento y desarrollo del maíz

El maíz, cuyo nombre científico es *Zea mays*, es una de las plantas que su desarrollo se puede dividir en dos etapas fisiológicas. La etapa vegetativa donde se desarrollan los distintos órganos y finaliza con la aparición de los órganos de reproducción y surge la segunda etapa llamada de reproducción, donde los órganos reproductivos llevan a cabo la fecundación. FAO (2018).

Por otro lado, se trata de una planta que presenta una modificación fotosintética que se le denomina C4, dándole un mecanismo eficiente en el intercambio de agua, por lo que el uso del agua en el cultivo del maíz es alto.

Los requerimientos hídricos para este cultivo varían de 500 a 1000 mm dependiendo del clima y la duración total del período de crecimiento (Abdullah Karasu et al., 2015), este cultivo se considera alta sensible al déficit hídrico.

La relación que existe entre el rendimiento del cultivo del maíz y el uso del agua se puede expresar bajo relación de la disminución relativa del rendimiento con la disminución relativa de la evapotranspiración (ET) (Steduto *et al.*, 2009). El enfoque central de lo antes mencionado se basa en la siguiente ecuación 1 (Doorenbos y Kassam, 1979):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

Donde Y_x corresponde al rendimiento máximo, Y_a al rendimiento Real, ET_x y ET_a a la evapotranspiración máxima y real, mientras que el K_y es el factor respuesta del rendimiento. La ecuación permite observar y calcular la disminución relativa del rendimiento en base a la disminución relativa de la evapotranspiración, es decir es una función de productividad, aplicable a la mayoría de los cultivos agrícolas, como son: herbáceos, arbóreos y vides (cultivos leñosos como olivos, almendros y frutales) (Steduto *et al.*, 2012).

Cabe destacar que los efectos de la falta de agua afectan directamente al rendimiento, por lo que es un factor que se produce por la disminución de la evapotranspiración sobre el rendimiento y sus pérdidas (Toro Trujillo *et al.*, 2016).

Los distintos valores del factor respuesta al rendimiento lo provocan principalmente los periodos y etapas de crecimiento de cada cultivo, por lo que Steduto *et al.*, (2012) presentan valores de K_y que los define para cada cultivo, como se indica a continuación:

$K_y > 1$: Mayor disminución del rendimiento del cultivo por alta sensibilidad al déficit hídrico

$K_y < 1$: Los cultivos muestran disminuciones menores de rendimiento, debido a la recuperación parcial del estrés al ser más tolerantes al déficit hídrico.

$K_y = 1$: los cultivos disminuyen su rendimiento directamente proporcional a la disminución del agua.

El déficit hídrico se aborda en distintas investigaciones, mostrando relevancia cuando la respuesta cuando los cultivos tienen la falta de agua. En caso del cultivo de maíz en las etapas donde más sensibilidad al estrés hídrico presenta son las de floración y formación, caso contrario las de menor afectación, son las etapas de maduración y vegetación sobre el rendimiento. Como lo indica la siguiente figura.2.1

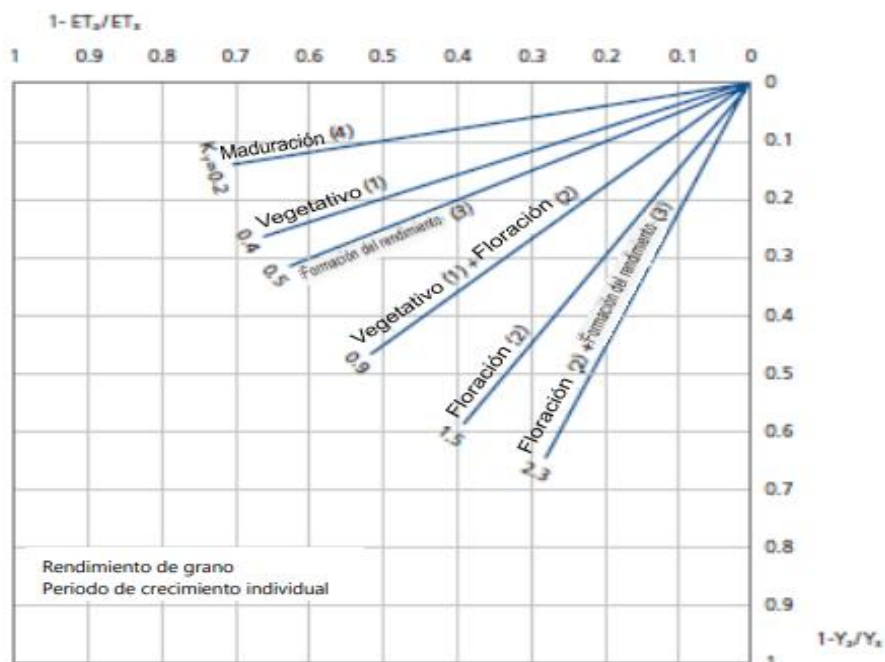


Figura 1. Funciones lineales de producción del agua para el maíz, (Steduto et al., 2012).

4.3 El cambio climático y su impacto en la agricultura

El clima se puede definir como la descripción del tiempo atmosférico, cuando se presentan variaciones de manera prolongada o permanente, se produce a lo que se denomina cambio climático. Esas variabilidades en el clima se le puede atribuir a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica. (IPCC, 2018)

El cambio climático se encuentra en aumento ante las distintas situaciones que se presentan a nivel mundial, donde se reportan aumentos en la temperatura con respecto de la tierra fue de 1.59 °C mientras que para los océanos el aumento fue de

.88 °C, teniendo un aumento global del 1.1°C, actualmente las principales causas sobre el aumento son las actividades humanas.

Entre los impactos y efectos generalizados atribuidos al cambio climático donde se puede observar daños en la salud y bienestar como el incremento y aparición de enfermedades, en los asentamientos y ciudades también se presentan daños en infraestructura impactando los sectores económicos; por otro lado las generaciones actuales y futuras experimentarán un mundo más cálido si la tendencia sigue, llegando a aumentar para los años 2060- 2100 hasta 4°C; en el sector de la biodiversidad altera los ecosistemas terrestres, así como del agua dulce y océano; las consecuencias de las condiciones climáticas físicas tienen efecto en la producción de alimentos donde se observan aumentos en sequía dificultando la disponibilidad de agua para la agricultura.

4.3.1 Acciones de adaptación

La necesidad de lograr asegurar un futuro sostenible para todos los sectores implica una mejora significativa y efectiva para la adaptación y mitigación del cambio climático. Por lo que ya existen opciones viables de bajo costo en los distintos sectores y sistemas. Entre las opciones de corto plazo para la mitigación en el ámbito de producción de alimentos específicamente la agricultura es la administración eficiente del uso y manejo del agua, el mejorar la gestión de las tierras de cultivo para reducir el metano y el NO₂ es de las opciones más viables en lo que es el bajo costo para reducir el efecto de los gases invernadero.

En las prácticas agrícolas cuando no se tiene un adecuado manejo aumenta la carga de contaminantes por el mal uso de insumos agrícolas, por lo que puede perjudicar la salud humana y animal, además la labor agrícola está relacionada con la calidad del agua por lo que es necesario hacer una adecuada gestión de este recurso. Melo Sagobal *et al.* (2024) indicaron que ante el cambio climático el desafío principal es la crisis del uso del agua en la agricultura, por lo que se deben adoptar nuevas tecnologías para hacer posible el máximo uso eficiente de este recurso. Actualmente para proveer agua a las plantas se está implementando la programación de riegos a partir de la identificación de los requerimientos hídricos de los cultivos uso de modelos

matemáticos que integren información de su estado fisiológico según la etapa del ciclo de cultivo en la que se encuentre.

4.4 Manejo de sequías en la agricultura

La sequía se define como el fenómeno meteorológico que se produce de manera natural cuando las lluvias son inferiores a los niveles normales registrados y que por lo tanto causan un agudo desequilibrio hídrico, perjudicando los sistemas de producción del suelo y la vegetación, alterando los procesos ecológicos e hidrológicos que se desarrollan dentro del sistema (Batista *et al.*, 2016).

En el ámbito agronómico las sequías se manifiestan directamente en la reducción de cosechas, pastizales y producción forestal, por lo que se transforma en merma en los ingresos del agricultor (Lobato-Sánchez, 2016).

4.4.1 Clasificación de sequías

El monitor de sequía de América del Norte (NADM) clasifica la intensidad de sequía en cuatro categorías, la D0 (normalmente seco) no se considera una categoría si no se trata de una condición de sequedad la cual se presenta al inicio o final de un periodo de sequía, lo que puede ocasionar retraso de siembra a los cultivos sembrados anualmente, pero también inhibir el crecimiento de cultivos perennes o pastos o hasta llegar el grado de no recuperarse, la D1 (sequía moderada) se presenta con mejor intensidad por lo que llega a causar daños en cultivos y pastos, y como consecuencia existe riesgo de incendios, los niveles bajos de agua en ríos, pozos, arroyos, embalses, por lo que se recomienda una restricción voluntaria del uso del agua, la D2 (sequía severa) tiene alto riesgo de incendio y se presentan pérdidas en los cultivos, además la escasez de agua es común, la sequía extrema que se clasifica como D3 tiene efectos de pérdidas mayores en los cultivos y el riesgo en incendios forestales es extremo, para el uso de agua se generalizan las restricciones, por último la clasificación D4 (sequía excepcional) pone en situación de emergencia por la ausencia de agua total en embalses, arroyos y pozos, causa grandes pérdidas generalizadas de cultivos y pastos al igual que el riesgo excepcional de incendios.

4.4.2 La sequía en México

El área afectada por sequía en México durante los últimos 20 años según el Monitor de Sequía en México(2024) tiene una variabilidad, del año 2004 al 2006 los porcentajes de niveles de sequía D3 (sequía extrema) fueron menores del 4%, mientras en el año 2011 el nivel de sequía fue excepcional(D4) la cual se presentó alcanzando hasta 23%, para el periodo 2014 hasta el año 2018 los niveles de área afectada por sequía no fueron significativos, puesto que los niveles máximos de sequía moderada (D1) no supero el 14%, por otro lado la tendencia al aumento en el área afectada aumento a partir del año 2020, donde las clasificaciones D2,D3 y D4 se siguen presentado de manera significativa.

En el territorio nacional cuenta con trece organismos de cuenca, los cuales están distribuidos por zonas, el organismo con clave III llamado Pacífico Norte donde incluye los estados de Chihuahua, Durango, Nayarit y Sinaloa, este último cuenta con nivel alto de afectación de sequía, donde el cien por ciento de sus municipios se encuentran entre sequía extrema y excepcional (Monitor de Sequía 2024). La figura 2. muestra las intensidades de sequía en el último año, desde septiembre del 2023 que corresponde al inciso A, donde los meses septiembre, octubre y noviembre, el impacto de sequía se encuentra en casi toda la superficie del país, para la inciso B del periodo diciembre a febrero, la parte norte y centro de país se tenían sequia extrema, para inciso C que corresponde a los meses marzo, abril y mayo, la parte centro y noroeste con sequia de impacto excepcional, mientras que para el inciso D la parte noroeste sigue con sequia severa que es donde corresponde a la zona de estudio de este trabajo.

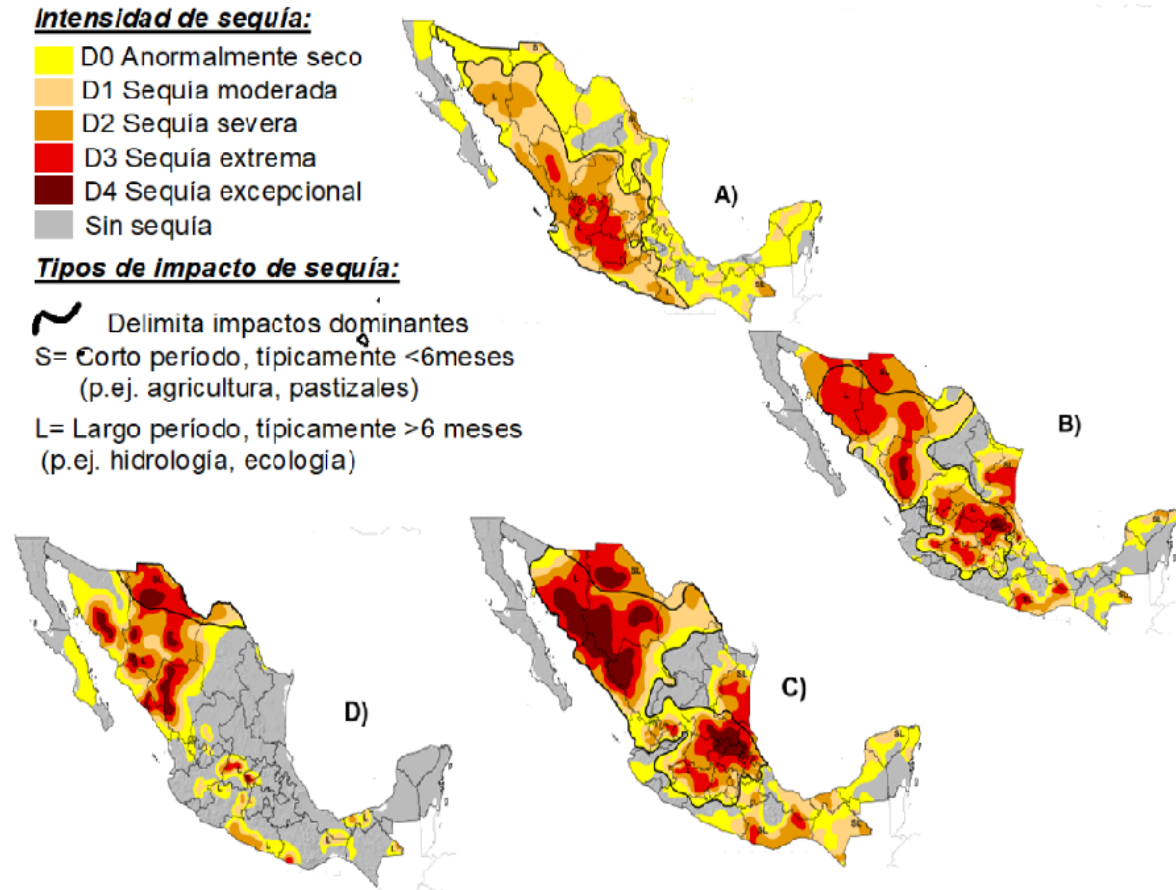


Figura 2. Estado de la sequía de México del 2023
(<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>)

4.5 Modelos de simulación de rendimientos

Los modelos de simulación de cultivos son una herramienta potente, que sirven para estimar el rendimiento bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo del cultivo, combinando un conjunto de datos de diferentes disciplinas que permiten el análisis de distintos escenarios de manera rápida.

Existen distintas instituciones de que han desarrollado este tipo de modelos (DSSAT, APSIM, CERES, AquaCrop, entre otros), por lo que este tipo de modelos cuentan con una estructura similar en los requerimientos de datos de entrada, que van

desde los parámetros fisiológicos y fenológicos de los cultivos, el manejo de este, características del suelo y datos climáticos diarios. Con base en lo anterior, algunos de los modelos tienen las desventajas de requerir parámetros con gran dificultad para su calibración y operación.

Cuadro 1. Características generales de los modelos de simulación de rendimiento en los últimos 30 años.

Modelos de simulación	Características generales
DSSAT-CERES-Maize (Año de creación: 1989)	Es usado para determinar las necesidades de agua de los cultivos basándose en información climática, fenológica y edafológica. Además, facilita la creación de calendarios de riego para diversas condiciones de gestión y la determinación del esquema de suministro de agua para diferentes tipos de cultivos.
APSIM (Año de creación: 2007)	Es un modelo integral creado para replicar procesos biofísicos en sistemas de agricultura se organiza alrededor de módulos. Estos módulos abarcan una extensa variedad de cultivos, pasturas y árboles, procesos del suelo, que abarcan el equilibrio hídrico, las modificaciones de N y P, el pH del suelo, la erosión y una serie completa de controles.
InfoCrop (Año de creación: 2005)	Modelo de simulación dinámica basado en procesos para simular el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento. Simula los efectos del clima, el suelo y la gestión de los cultivos (siembra, densidad de semillas, nitrógeno orgánico e irrigación) y las plagas. Proporciona resultados diarios y resumidos sobre diversos parámetros de crecimiento y rendimiento, absorción de nitrógeno, emisiones de

gases de efecto invernadero, agua del suelo y balance de nitrógeno.

CropWat (Año de creación: 1995)	Es un software que calcula las necesidades de agua y de irrigación de los cultivos, basándose en información del terreno, el clima y los cultivos. Además, el programa facilita la creación de programas de riego adaptados a diversas condiciones de gestión y el cálculo del abastecimiento de agua para diversos modelos de cultivo. También puede emplearse para valorar las prácticas de riego de los agricultores y calcular el rendimiento de los cultivos tanto en situaciones de temporal como de riego.
------------------------------------	---

4.5.1 El modelo AquaCrop

AquaCrop constituye un modelo que se desarrolló y donde se trata de separar la evaporación del suelo (parte no productiva) con la transpiración del cultivo (parte productiva) y evaluar la obtención de la biomasa a través de la transpiración real del cultivo que se analiza a partir de la medida de la producción del agua, principalmente (Steduto *et al.*, 2012). El modelo es de tipo dinámico que simula el rendimiento de varios cultivos herbáceos, pero siempre depende del suministro de agua.

Adicionalmente, este modelo se compone de las cuatro partes: 1) clima, 2) cultivo, 3) características del suelo y 4) manejo. Las simulaciones pueden ser realizadas tomando en cuenta una variedad de climas y condiciones de manejo, incluyendo el cambio climático. No obstante, el modelo AquaCrop no se enfoca en el análisis de plagas y enfermedades (Steduto *et al.*, 2009).

Clima

La temperatura máxima (Tx) y la temperatura mínima (Tn) del aire, la precipitación y la evaporación del ambiente atmosférico (Olivera *et al.*, 2016), se identifican como las cuatro opciones meteorológicas diarias que se ubican dentro del análisis del clima. Aparte de estas variables, también se necesita de la concentración media anual de CO₂ (dióxido de carbono) (Flores-Gallardo *et al.*, 2013), que dentro del modelo y a modo de simplificación, ya viene incorporado con valores preestablecidos que provienen de la estación de Mauna Loa, Hawai desde 1902 hasta el último año en que se pueda medir (Steduto *et al.*, 2009).

Características del suelo

Debido a su relación con la producción de biomasa y la transpiración, el balance hídrico del suelo juega un papel importante en la modelación. AquaCrop, el suelo lo describe como un perfil estratificado y una capa de agua freática.

El modelo AquaCrop divide el suelo en áreas que generalmente son cinco con sus respectivas características físicas para representar la acción del agua en el suelo. Esto se debe a que el sistema radicular tiene la tarea de conservar el agua proveniente de los flujos de agua entrantes (lluvia, irrigación y capilaridad) y los flujos de agua salientes (escurrimiento, evaporación, transpiración y percolación profunda). El contenido de humedad (TAW), la capacidad de campo (FC), el límite inferior del contenido de agua hasta el punto de marchitez permanente del cultivo (PWP) y la capacidad de campo, conducción hidráulica son las características del suelo principales que se ajustan al modelo AquaCrop.

Cultivo

Después de que el cultivo en ha alcanzado la etapa de emergencia, comienza su crecimiento y progresivo desarrollo hasta que se forma el dosel y las raíces de la planta comienzan a profundizar. De acuerdo con el Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66, el componente del cultivo contiene subcomponentes

Fenología: para cada cultivo, se deben especificar sus etapas de desarrollo y duración, por lo tanto, las etapas más importantes en el crecimiento del cultivo son la emergencia, el inicio de la floración, el inicio de la senescencia del dosel y la

maduración, que se aplican a todos los cultivos herbáceos excepto a los cultivos forrajeros.

Cobertura dosel: la cobertura del dosel verde (CC) es un subcomponente esencial en la simulación porque su expansión, envejecimiento, senescencia y conductancia permitirán obtener la cantidad de agua transpirada y, por lo tanto, la biomasa generada. Además, puede usar valores reales al expresar el desarrollo del dosel en fracciones o porcentajes.

Profundidad de las raíces: el modelo computacional, se puede simular la absorción del agua utilizando la profundidad efectiva de la raíz (Z_e). Los valores de profundidad mínimos de 0,2 a 0,3 m se pueden utilizar en AquaCrop, pero estos valores cambiarán de acuerdo con una función exponencial porque las raíces aumentarán su profundidad después de la siembra.

Transpiración del suelo: AquaCrop calcula este componente mediante la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración (Tr) siempre que el suelo esté sin sombra. Se sabe que la evaporación proviene del suelo húmedo que no está protegido por el dosel.

Biomasa: la productividad de la biomasa (WP) es crucial porque se ha demostrado que tiene un comportamiento relativamente constante a pesar de las diversas demandas evaporativas (de Wit, 1958). Por otro lado, la evaporación atmosférica (E_{To}) y la concentración de CO_2 ambiental se utilizan para simular la normalización de la productividad de biomasa (WP^*) en AquaCrop. Además, se descubrió que WP^* es aproximadamente constante para cualquier cultivo, siempre y cuando no haya restricciones en la necesidad de nutrientes minerales.

Índice de cosecha (IH): El HI que se presenta durante la etapa de maduración, debe utilizarse para modelar el rendimiento (Y) que se obtiene de una parte de la producción de biomasa. Este índice se simula de tal manera que en la fase de floración debe comenzar desde cero, luego subir gradualmente hasta alcanzar una velocidad específica en función del tiempo y finalmente llegar a la fase de estabilización, que es la etapa final (Steduto *et al.*, 2012).

Transpiración del Cultivo: determinar el valor de la cobertura del dosel (CC), la apertura de las estomas e incluso la evaporación requerida por la atmósfera es el desafío más difícil para modelar la transpiración del cultivo en AquaCrop. Se puede afirmar que la transpiración (Tr) es proporcional a la cobertura del dosel (CC) si hay un ajuste de micro advertencia entre hileras y el efecto de protección de la cobertura es incompleta.

Manejo

El programa se estructura en dos prácticas el manejo; la primera aborda la gestión del riego, que incluye la elaboración de un calendario de riego, la estimación de las necesidades netas de agua y la creación de una carpeta con los registros de riego aplicados en cada campaña, siguiendo las recomendaciones de Raes et al. (2009); la segunda práctica se centra en el manejo del cultivo, es decir, en las labores agronómicas específicas relacionadas con el cultivo

4.5.2 Calibración y Validación

El modelo AquaCrop categoriza en dos los parámetros para analizar el comportamiento de un cultivo en diferentes condiciones climáticas y de suelo. Por lo tanto, el primer tipo de parámetro se conoce como conservativo (Vanuytrecht *et al.*, 2014), mientras que el segundo tipo de parámetro se denomina no conservativo es el que el usuario ingresa específicamente. Cualquiera que sea la condición de crecimiento o el régimen hídrico, los parámetros conservativos suelen ser constantes, mientras que el segundo tipo se enfoca en variedades de alto rendimiento donde la fertilidad es excelente y no hay restricciones en el consumo de agua. Si bien se mencionó que los parámetros conservativos no cambian, puede haber cierta variación en el caso de que existan otras especies en el mismo cultivo. Por lo tanto, se hizo necesario establecer una nueva asignación: esta opción permite establecer varias clases de cultivo con sus correspondientes parámetros conservativos (Steduto *et al.*, 2012).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción de la zona de estudio

La investigación se realizó en el área del distrito de riego 075 “Río Fuerte” (DR-075), en la zona del norte de Sinaloa, México ($25^{\circ} 48.89' N$, $109^{\circ} 1.53' O$ y altitud promedio de 20 m), correspondientes a los terrenos del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) como indica en la figura 5.1, en la ciudad de Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, a la altura del km 1609 de la carretera internacional México-Nogales.

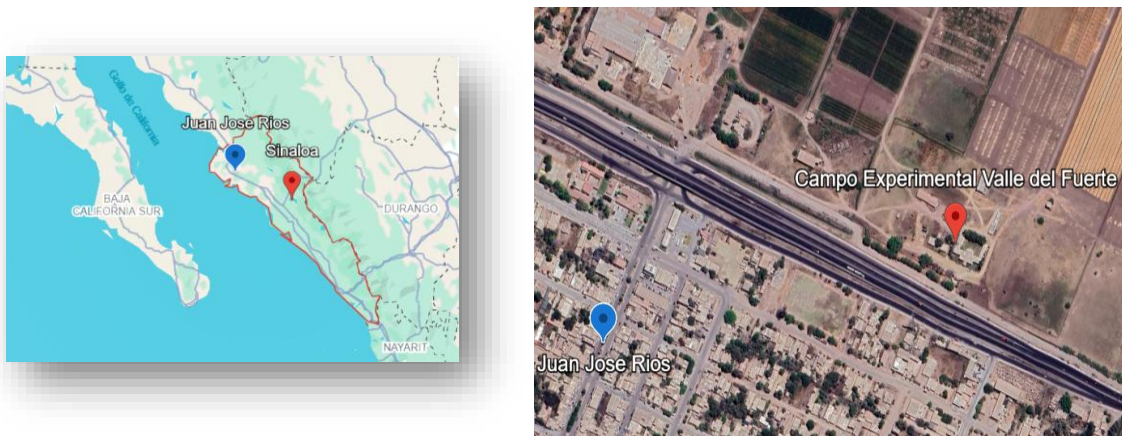


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio

La precipitación en el Valle del Fuerte se concentra durante cuatro meses, de julio a octubre, principalmente por la presencia de ciclones y varía alrededor de 170-410mm anuales. Esta región tiene una temperatura anual de $25^{\circ}C$ con un clima considerado cálido seco, por lo que indica que se requiere de riego para asegurar rendimientos comerciales. En últimos años se ha presentado alta variabilidad climática y periodos de sequía extrema. El Cuadro 2 muestra los ultimo 4 ciclos agrícolas OI, donde se puede observar las diferentes temperaturas, donde el ciclo 21-22, promedia una temperatura hasta un $1^{\circ}C$ más que los demás años, también el cuadro nos indica las precipitaciones durante los ciclos agrícolas, donde la presencia de lluvias cada vez es más ausente.

Cuadro 2. Valores de Temperaturas (mínimas, máximas y medias) y precipitaciones del periodo octubre-abril de los últimos cuatro ciclos agrícolas otoño-invierno, en el norte de Sinaloa

Ciclo agrícola	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Temperatura media	Precipitación
Otoño-invierno	-----°C -----			(mm)
20-21	11.8	28.8	20.27	ND
21-22	12.5	30.0	21.3	524.1
22-23	11.0	28.6	19.8	270.1
23-24	12.5	29.2	20.9	344.1
Rango	+1.5	+1.4	+0.5	-254

Los tipos de suelos que predominan en la zona de estudio son de tipo vertisol(arcillosos) como lo indica la figura 4, que cuentan con buena calidad agrícola para establecer diversos cultivos agrícolas (INEGI,2020).

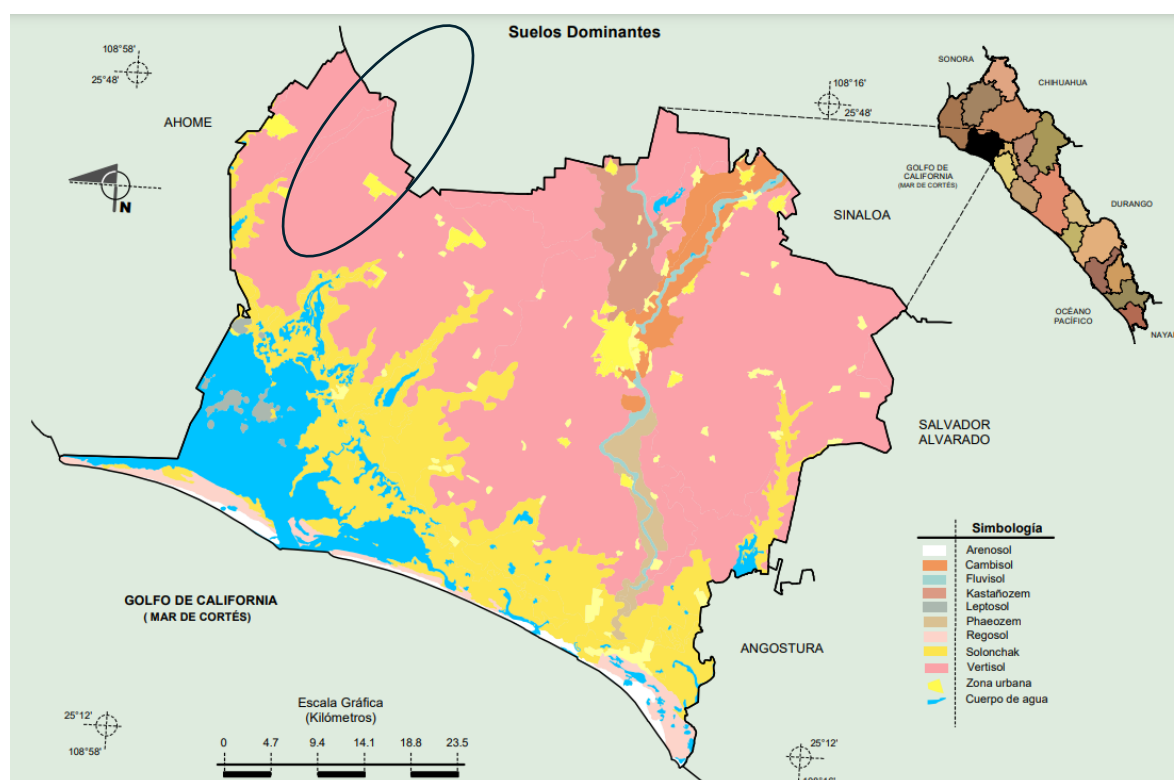


Figura 4. Tipos de suelo que predominan en la zona de estudio Valle del Fuerte(https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/25/25011)

5.2 Calibración y validación del modelo AquaCrop

5.2.1 Calibración

Para fines de calibración se tomó como base la información generada por Flores-Gallardo *et al.* (2013) y Sifuentes-Ibarra *et al.* (2020), con la finalidad de obtener una mayor precisión y ajuste en los parámetros requeridos por el programa. Con el fin de tener información experimental de campo, se estableció un experimento bajo un diseño de bloques al azar con una significancia del .05 y una prueba de tukey al .05 el análisis de datos se realizó con el programa Infostat de libre acceso (<https://www.infostat.com.ar/>) durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2022/2023 donde se evaluó el rendimiento de cuatro híbridos, HIPOPÓTAMO (H1), DEKALB 5021(H2), MX8639 (H3) y VX8410(H4), con dos disponibilidades hídricas como se muestran en el Cuadro 3, los cuales llevaron por nombre 4A, que consistió en cuatro riegos de auxilios, mientras que el 3A en 3 riegos de auxilio. Para el uso de análisis de calibración del programa AquaCrop se utilizó el híbrido HIPOPÓTAMO por ser el más utilizado en la zona de estudio.

Cuadro 3. Parcelas experimentales utilizadas en la calibración del modelo AquaCrop.

Nombre	Clave	Descripción
Disponibilidad hídrica normal	4A	Cuatro riegos de auxilio
Disponibilidad hídrica al 75 %	3A	Tres riegos de auxilio

La parcela experimental se formó de 12 surcos de 0.80 m de separación por 106 m de longitud (1017 m²). La fecha de siembra fue 14/12/2022 con el híbrido comercial Hipopótamo con densidad de siembra de 110,000 semillas ha⁻¹.

Se utilizó el software AquaCrop 7.1 estándar de libre acceso (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es>, donde se manejaron parámetros medidos experimentalmente, ajustados, estimados y parámetros que, por defecto, el modelo propone.

Información requerida

El modelo AquaCrop requiere datos vinculados con el clima, suelo, cultivo, gestión y condiciones iniciales, los cuales se introducen de forma organizada al Software para crear archivos de trabajo identificados con nombre y extensión determinados como se observa en la Figura 5.

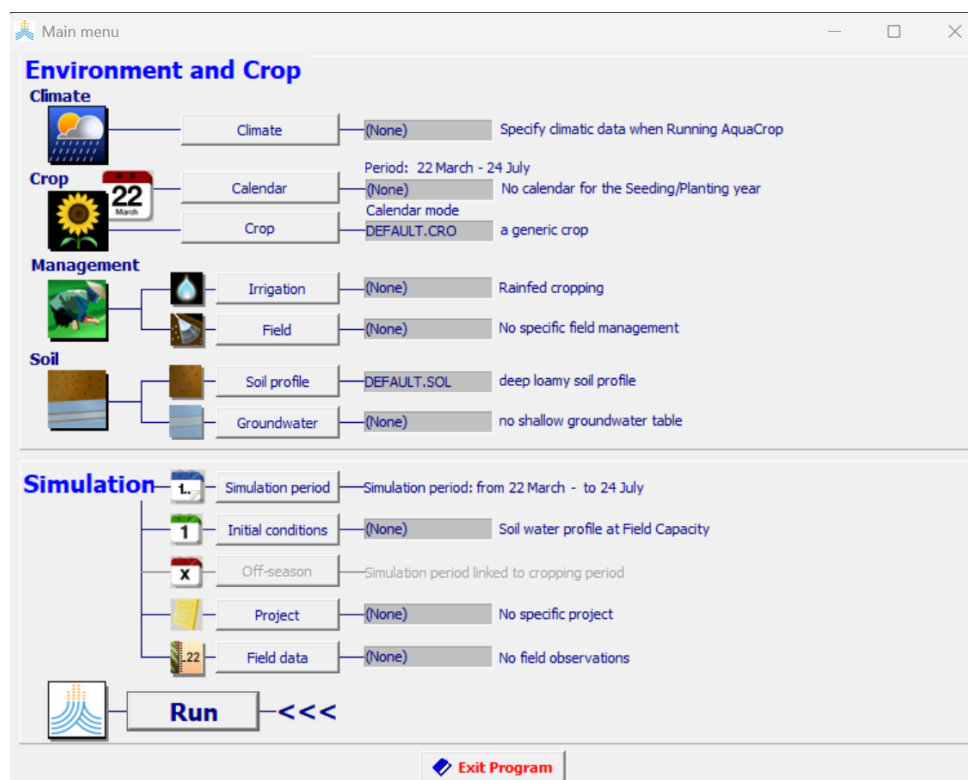


Figura 5. Interfaz principal de la versión 7.1 del modelo AquaCrop (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es,>).

Clima: Los datos requeridos para el apartado clima como se indica en la Figura 6, fueron tomados por Estación Meteorológica Automática (EMA) del CEVAF ubicada en el área experimental y que forma parte de la red nacional del INIFAP), donde se requirieron diariamente la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$) expresados en °C, precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ET_o) expresados en mm, mientras que la concentración de CO_2 la predetermino el modelo los cuales se adquirieron del Observatorio de Mauna Loa en Hawai desde 1902.

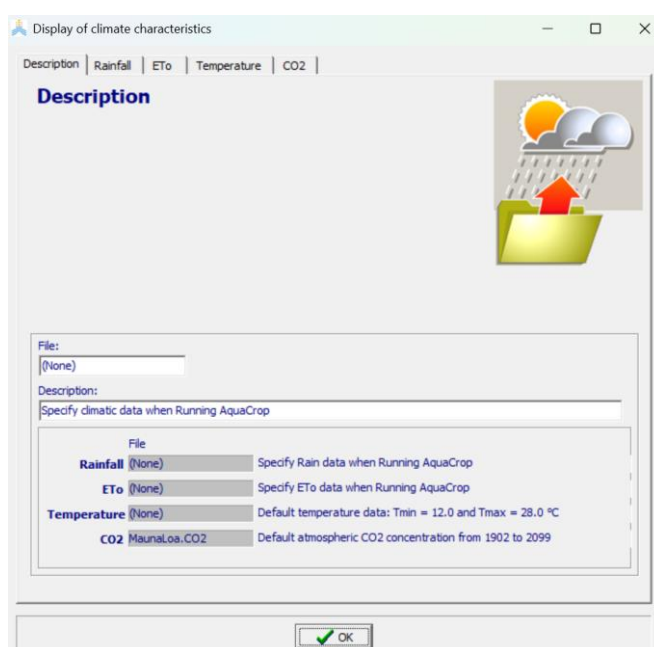


Figura 6. Ventana del apartado clima de la versión 7.1 del modelo AquaCrop, (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es,>).

Suelo: las características fisicoquímicas e hidráulicas del lote experimental que se requieren del suelo como lo indica la Figura 7, son textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), saturación (SAT) y conductividad eléctrica (CE). Por lo que se realizó un análisis a una profundidad de 0-30 y 30-60 cm (zona de máxima actividad radical) en los dos ciclos agrícolas, las constantes CC, PMP, SAT y K_s se estimaron con la metodología reportada por Rendón *et al.* (2012) verificando CC en forma gravimétrica, en lo corresponde el K_s se ajustó sobre lo

medido en campo para un suelo arcilloso. En el modelo se consideraron un suelo profundo y poco heterogéneo, así como cuatro estratos de 30 cm asumiendo características similares.

The screenshot shows the 'Display of Soil profile characteristics' window. It has tabs for 'Description', 'Characteristics of soil horizons', 'Soil surface', and 'Capillary rise'. The 'Characteristics of soil horizons' tab is active. On the right, there is a visual representation of the soil profile with three horizons labeled 1, 2, and 3. Below this, there is a 'Plot' button and a dropdown menu set to 'soil water'. The main area contains a table of soil characteristics for horizon 1.

horizon	description	thickness m	TAW mm/m	retention in fine soil fraction			hydraulic conductivity	
				PWP	FC vol %	SAT	Ksat mm/day	tau
1	Loamy soil horizon	4.00	200	10.0	30.0	50.0	500.0	0.76

At the bottom of the window, there is an 'OK' button with a green checkmark.

Figura 7. Ventanilla del apartado suelo de la versión 7.1 del modelo AquaCrop, (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es,>).

Riego: durante los dos ciclos agrícolas, se efectuó un riego de germinación al momento de la siembra con el objetivo de conducir el suelo a CC en todas las capas del suelo. La temperatura media del aire (T_a), ETo y PP necesarias para este método se adquirieron de la EMA del CEVAF, mientras que la programación de los riegos de auxilio se llevó a cabo a través de la metodología de balance hídrico en tiempo real y el concepto GDD (programación integral) producida y verificada para el área de estudio, que consistió para la condición hídrica normal en cuatro riego de auxilios en las etapas V8,RT,R1 y R3 y una lámina neta de 504 mm, mientras que para la condición de sequía fueron tres riegos de auxilio en las etapas V10, R1 y R3 y una lámina neta de 447mm. En la Figura 8 se observa la ventanilla donde el programa requiere el calendario de riego por días después de siembra y la lámina aplicada en mm, además si el suelo tiene un problema de conductividad eléctrica.

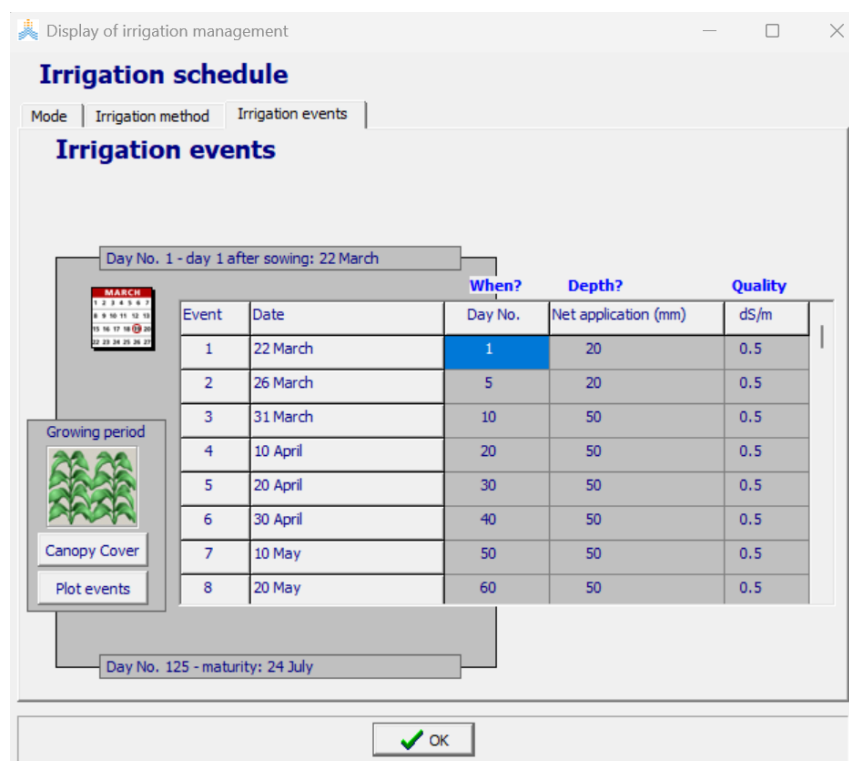


Figura 8. Ventanilla del apartado riegos de la versión 7.1 del modelo AquaCrop. (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es>).

Cultivo: Los parámetros que requiere el modelo se dividen en conservativos y no conservativos, los principales parámetros como se observan en la Figura 9 son los conservativos: 1) temperatura mínima ($T_{\min}$) y máxima ($T_{\max}$) de desarrollo del cultivo, 2) cobertura inicial del dosel (CCo), crecimiento máximo del dosel (CCx), coeficiente de transpiración máxima del cultivo ($K_{cb,x}$), productividad del agua normalizada (WP^*), índice de cosecha de referencia (HI), declinación del dosel en senescencia, CGC y GDC, los cuales no pueden cambiar una vez que se determinan, por otro lado los no conservativos.

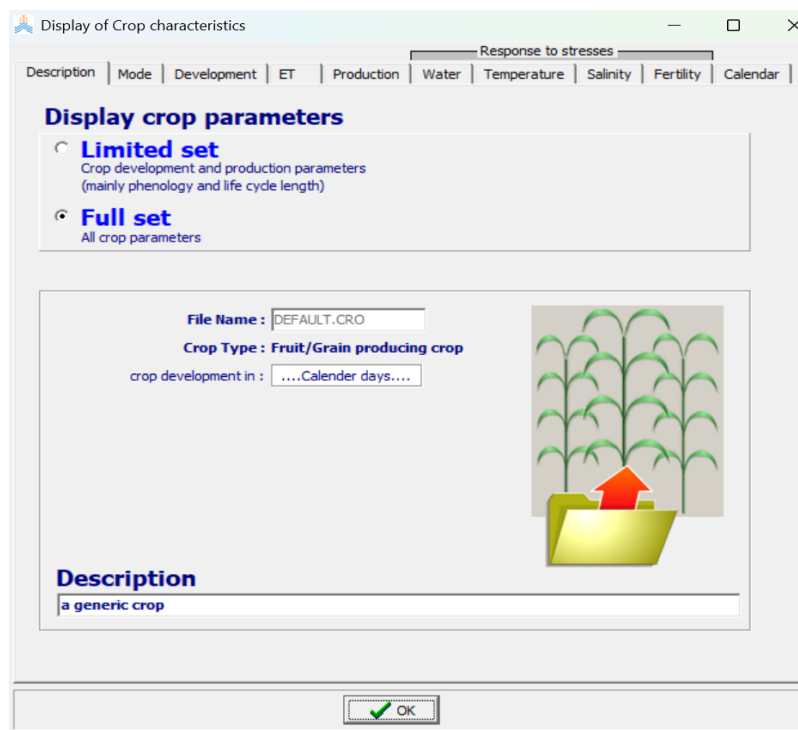


Figura 9. Ventanilla del apartado parámetros del cultivo de la versión 7.1 del modelo AquaCrop, (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es>).

Biomasa (B) y rendimiento (Y): AquaCrop utiliza los parámetros de senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha serán necesarios para la producción de biomasa y grano. Para el cálculo del rendimiento se utilizó la siguiente ecuación $Y = B * H_i$, donde B es la biomasa del cultivo y H_i índice de cosecha dependiendo del tipo y variedad del cultivo.

5.2.1.1 Evaluación

La evaluación consistió en la comparación estadística entre los valores experimentales y los resultados simulados del rendimiento. Para ello, se utilizaron indicadores estadísticos, entre los cuales se incluyó la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), calculada mediante la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_s - Y_o)^2}{n}}$$

Donde Y_s representa el valor estimado o simulado de la variable analizada, Y_o es el valor observado o experimental de la misma variable y n corresponde al número total de observaciones consideradas en el análisis.

5.2.2 Validación

La validación de modelo se realizó en el ciclo agrícola OI 2023-2024 tanto para disponibilidad hídrica normal y de sequía. Se utilizó un experimento donde se establecieron parcelas experimentales, donde se trabajó con siete híbridos, HIPOPOTAMO (H1), RINOCERONTE(H2), ARMADILLO(H3), DK4050(H4), DK5021(H5), CALAMAR (H6) y P3274W(H7) con dos niveles hídricos (4A y 3A), como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Parcelas experimentales utilizadas en la validación del modelo AquaCrop.

Nombre	Clave	Descripción	Etapas fenológica de aplicación del riego	Lamina Neta(mm)
Disponibilidad hídrica normal	4A	Cuatro riegos de auxilio	V8, VT, R1, R3	504
Disponibilidad hídrica con sequia	3A	Tres riegos de auxilio	V10, R1, R3	447

La preparación del lote experimental fue de manera tradicional, un barbecho, rastreo, la marca de separación de surcos fue de .80 m, en un área total de 6000 m² incluyendo los bordos de protección, se aplicó una fertilización base con una dosis de 450 kg ha⁻¹ de Urea y una misma dosis antes del primero riego de auxilio, la siembra se realizó el día 7/12/2023, con una densidad de 8 semillas por metro lineal del híbrido comercial Hipopótamo. Los riegos de auxilio fueron aplicados tal y como se indican en el Cuadro 4 para cada condición hídrica.

5.2.3 Generación de recomendaciones

Una vez calibrado y validado el modelo AquaCrop se generaron recomendaciones de requerimientos hídricos y manejo del riego en dos escenarios de disponibilidad hídrica (normal y sequía), en los que se tomaron en cuenta diez fechas de siembras con intervalo de 10 días, la primera fue el primero de noviembre y culminó hasta el primero de febrero, con tres ciclos agrícola térmicos otoño-invierno(OI) (neutro, frío y caliente) en base lo reportado por Sifuentes-Ibarra *et al.* (2020), además con tres texturas de suelo, arcilloso, franco arcilloso y franco limoso, considerando que las dos últimas fueron precargadas por el programa por default.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Modelo AquaCrop calibrado

En el Cuadro 5 se muestran los resultados de la calibración de algunos parámetros del modelo AquaCrop para el cultivo de maíz considerando el experimento establecido en el ciclo OI 2022-2023, además otros parámetros fueron obtenidos de investigaciones similares como lo reportado por Hassan *et al.* (2021), Abed *et al.* (2018), De Souza *et al.* (2021), Iglesias *et al.* (2020) y otros parámetros fueron precargados por default de modelo.

Cuadro 5. Resultados de la calibración de los parámetros del modelo AquaCrop para el cultivo de maíz durante el ciclo OI 2022-2023 en el norte de Sinaloa.

Parámetro	Valor
Temperatura base (°C) por debajo de la cual el desarrollo del cultivo no progresa	10 ^a
Temperatura superior (°C) por encima de la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con el aumento de la temperatura	3 ^a
Duración total del ciclo del cultivo en grados-día de crecimiento	1625 ^m
Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (Umbral superior)	0.2 ^d
Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (Umbral inferior)	0.55 ^d
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel (0.0 = línea recta)	2.9 ^d
Fracción de agotamiento del agua del suelo para el control estomático (Umbral superior)	0.55 ^d
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para el control estomático (0.0 = línea recta)	6 ^d
Factor de agotamiento del agua del suelo para la senescencia del dosel (Umbral superior)	0.55 ^d
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la senescencia del dosel (0.0 = línea recta)	2.7 ^d
Temperatura mínima del aire por debajo de la cual la polinización comienza a fallar (estrés por frío) (°C)	9 ^{ea}

Temperatura máxima del aire por encima de la cual la polinización comienza a fallar (estrés por calor) (°C)	35 ^{ea}
Grados mínimos de crecimiento requeridos para la transpiración completa del cultivo (°C - día)	11.1 ^{ea}
Coeficiente de cultivo cuando el dosel está completo, pero antes de la senescencia (KcTr,x)	1.1 ^d
Profundidad mínima efectiva de enraizamiento (m)	0.3 ^a
Profundidad máxima efectiva de enraizamiento (m)	1.1 ^a
Superficie del suelo cubierta por una plántula individual al 90 % de emergencia (cm ²)	6.5 ^e
Número de plantas por hectárea	110000 ^m
Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC): Aumento de la cobertura del dosel (fracción de cobertura del suelo por día)	0.10414 ^d
Cobertura máxima del dosel (CCx) en la fracción de cobertura del suelo	0.93 ^a
Coeficiente de disminución del dosel (CDC): Disminución de la cobertura del dosel (en fracción por día)	0.11323 ^a
Productividad del agua normalizada para ETo y CO ₂ (WP*) (gramos/m ²)	35 ^m
Productividad del agua normalizada para ETo y CO ₂ durante la formación del rendimiento (como % WP*)	100 ^d
Índice de referencia de cosecha (Hlo) (%)	49 ^m
Días GD: desde la siembra hasta la emergencia	110 ^m
Días GD: desde la siembra hasta la profundidad máxima de enraizamiento	808 ^m
Días GD: desde la siembra hasta el inicio de la senescencia	1343 ^m
Días GD: desde la siembra hasta la madurez (duración del ciclo del cultivo)	1625 ^m
Días GD: desde la siembra hasta la floración	807 ^m
Duración de la etapa de floración (días-grado de crecimiento)	194 ^m
Días GD: acumulación de la cosecha durante la formación del rendimiento	743 ^m

(m: medido, a: ajustado, e: estimado, d: default)

La Figura 10 presenta los resultados de rendimiento obtenidos para dos condiciones hídricas (cuatro y tres auxilios) del ciclo OI 2022-2023, en comparación

con los valores medidos en campo y otro derivado de simulaciones del modelo. Se observa un RMSE de 483 kg ha^{-1} en el rendimiento entre los medido y lo simulado, lo que indica que el modelo predice con un margen de error de alrededor del 3.6 % al 4.1 % respecto a los valores observados.

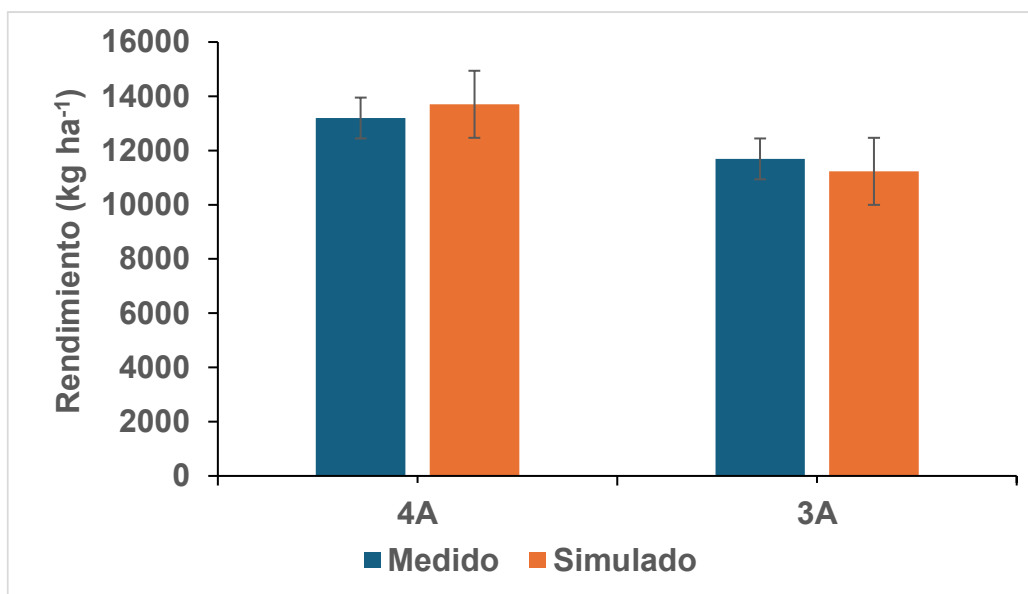
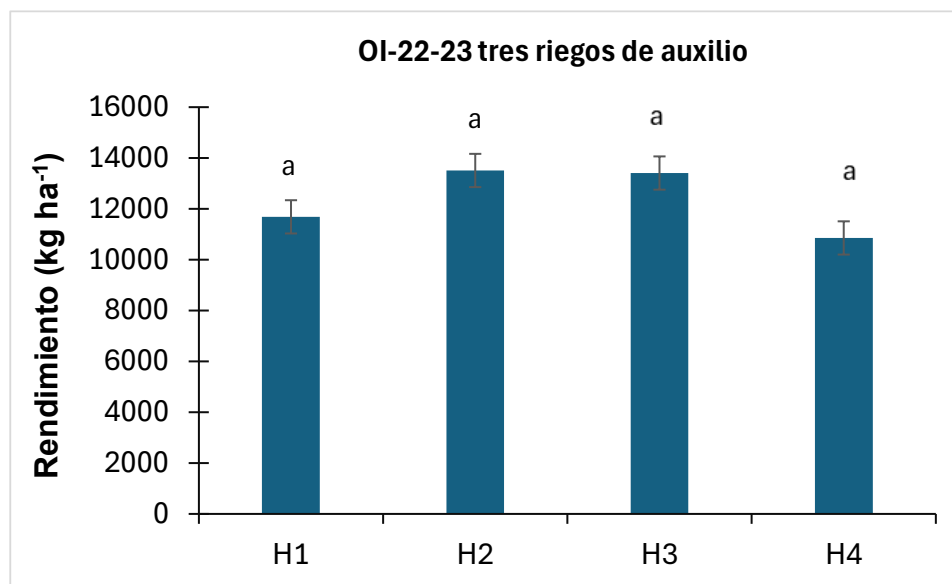


Figura 10. Rendimiento medido comparado con el rendimiento estimado con AquaCrop 7.1 en el ciclo OI 2022-2023 en dos condiciones hídricas.

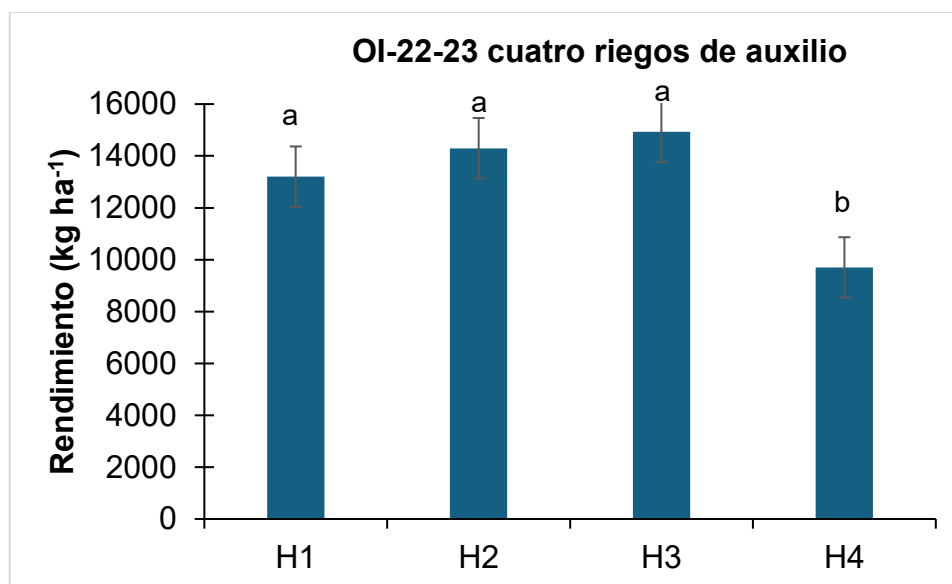
La Figura 11 muestra la media de los rendimientos de cuatro híbridos de maíz, con tres riegos de auxilio en ciclo OI 2022-23. Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) indicaron que no se presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los híbridos evaluados en cuanto al rendimiento del cultivo de maíz. Esta ausencia de significancia fue confirmada mediante la prueba de Tukey, donde todos los tratamientos tienen el mismo efecto.



Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 11. Comparación de rendimiento de cuatro variedades de maíz con tres riegos de auxilios en el ciclo OI 2022-2023. (Tukey al 0.05)

La prueba de comparaciones de Tukey reveló diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los cuatro híbridos evaluados, con cuatro riegos de auxilios, como lo muestra la figura 12, donde los tratamientos H1, H2 y H3 obtuvieron mejores rendimientos con respecto al tratamiento H4 que generó diferencia significativa al obtener menor rendimiento.



Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 12. Comparación de rendimiento de cuatro variedades de maíz con cuatro riegos de auxilios en el ciclo OI 2022-2023. (Tukey al 0.05)

6.2 Validación del modelo

Una vez calibrado el programa se procedió con la validación, realizada en el ciclo OI 2023-2024, el cual se validó con dos tipos de condiciones hídricas, tal como lo muestra la Figura 13 donde se realizó una comparación entre el rendimiento real obtenido en campo y el simulado. Se observa que se presentan diferencias hasta del 34% con un RMSE de 3105 kg ha⁻¹ en los valores de la condición 4A donde lo simulado por el modelo fue mayor, esto debido a la alta presencia de plagas y enfermedades que se presentaron durante el ciclo, mientras que para la condición de 3A se muestra una alta precisión entre lo medido y lo simulado al tener un RMSE DE 129 kg ha⁻¹ y con un margen error muy por de 1.07%.

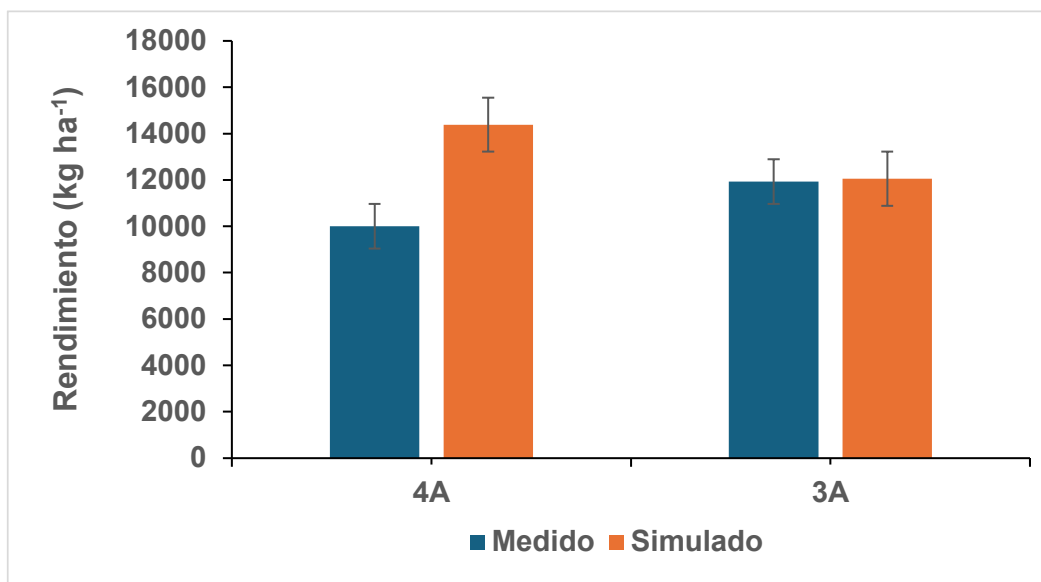
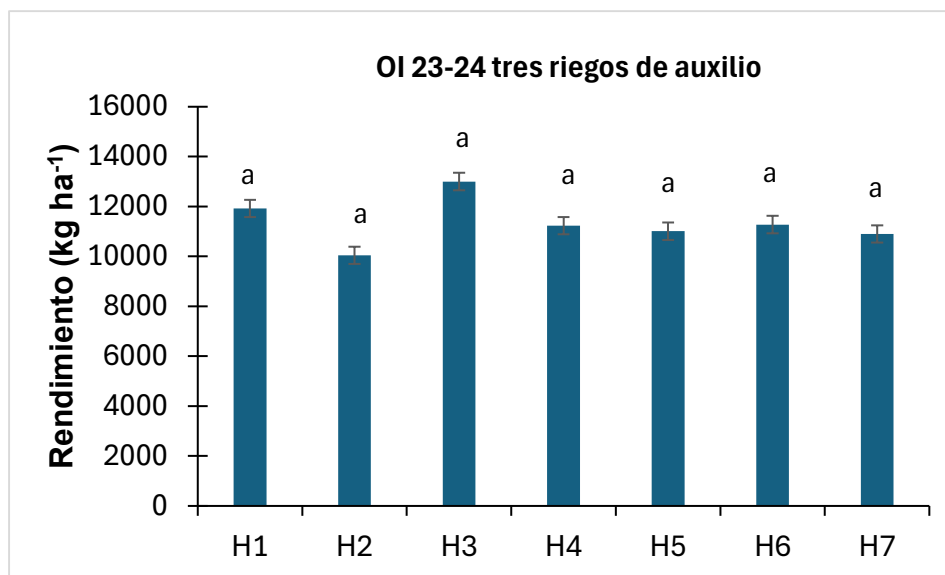


Figura 13. Rendimiento medido comparado con el rendimiento estimado con AquaCrop 7.1 en el ciclo OI 2023-2024 en dos condiciones hídricas.

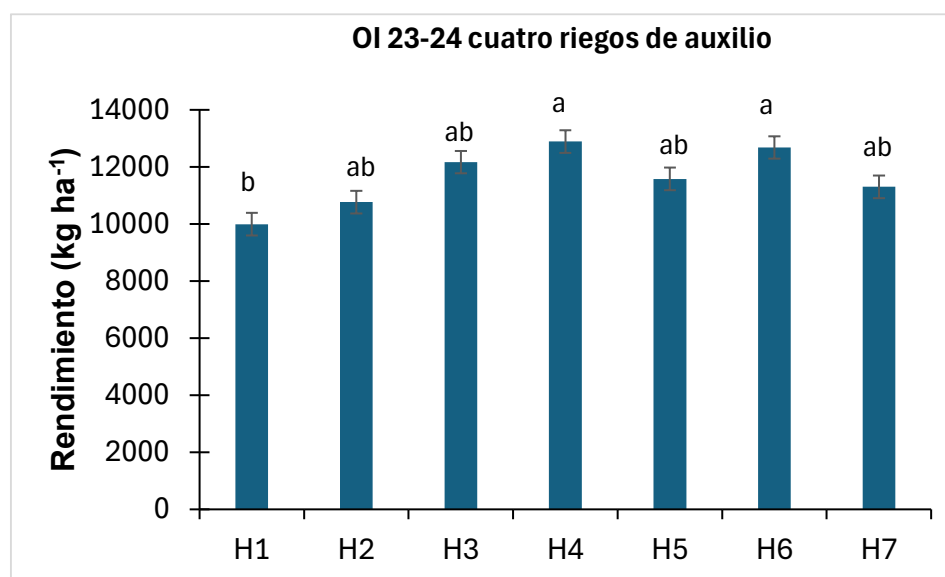
La figura 14 muestra las medias de los resultados obtenidos de siete híbridos de maíz, con tres riegos de auxilios, donde no hubo diferencias significativas (tukey .05) en el rendimiento, por lo que mostraron un comportamiento similar, destacando el tratamiento H3 que obtuvo la mejor media.



Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 14. Comparación de rendimiento de siete variedades de maíz con tres riegos de auxilios en el ciclo OI 2023-2024. (Tukey al 0.05)

Con respecto al experimento establecido con cuatro riegos de auxilios evaluando el rendimiento en siete híbridos, donde los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey al .05 evidenciaron una diferencia significativa entre las variedades evaluadas tal como lo muestra la figura 15, los tratamientos H4 y H6 mostraron mejor rendimiento, mientras que para los tratamientos H2, H3, H5 y H7 obtuvieron un rendimiento intermedio, el tratamiento H1 se comportó diferente al presenciar problemas de plagas y enfermedades por lo que su rendimiento fue menor causando diferencias entre los híbridos comparados,



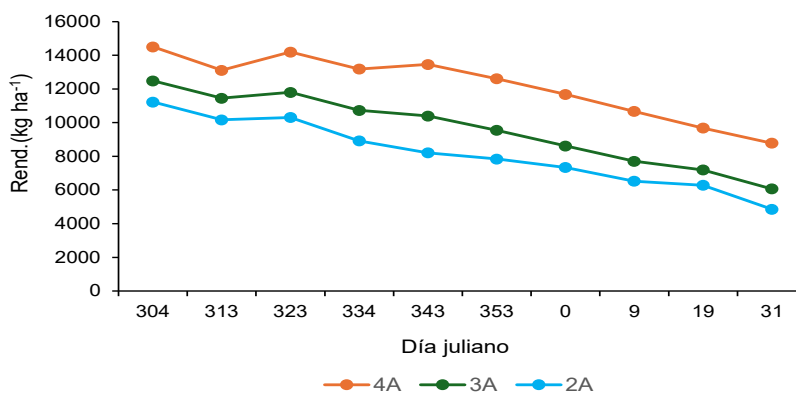
Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 15. Comparación de rendimiento de siete variedades de maíz con tres riegos de auxilios en el ciclo OI 2023-2024. (Tukey al 0.05)

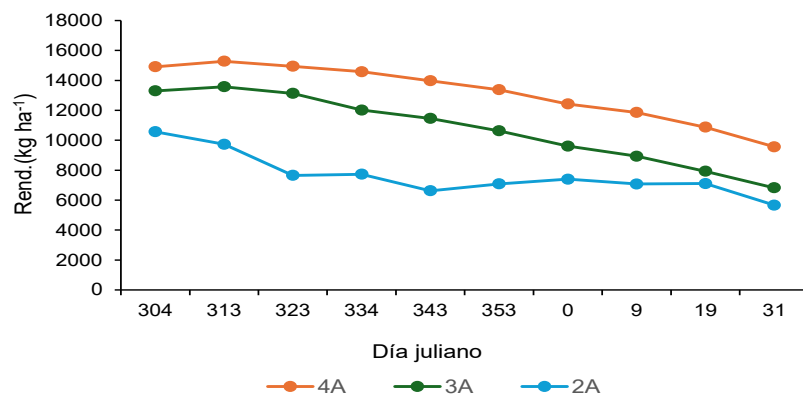
6.3 Modelación de fechas de siembra y requerimientos hídricos en escenarios climáticos y edáficos.

La Figura 16 muestra el comportamiento del rendimiento del cultivo de maíz, con tres condiciones hídricas (cuatro, tres y dos riegos de auxilio), durante diez fechas distintas de siembra en un suelo arcilloso con tres diferentes tipos de ciclo agrícolas

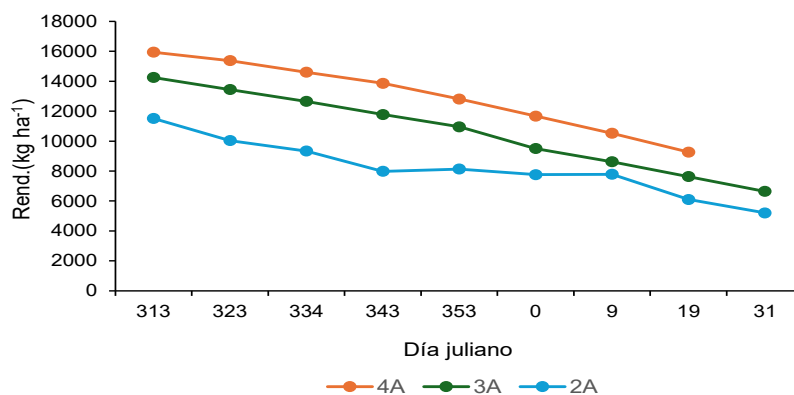
otoño-invierno (OI) en base a las temperaturas, donde el año neutro (a) correspondió al ciclo OI 21-22, durante ese ciclo las condiciones los mejores rendimientos se mostraron durante un periodo de 40 días, las fechas de siembras considerada fueron desde el día juliano 304 (primero de noviembre) al día 343 (10 de diciembre), mientras que a partir del 10 de diciembre las rendimientos tienden a reducirse en las 3 condiciones, para el año frío (b) que corresponde al ciclo OI 22-23, la ventana de fecha de siembra es más amplia para la condición de 4A abarca desde el día juliano 304 hasta el 343, teniendo un periodo óptimo de siembra de 40 días, para las condiciones 3A y 2A el inicio del periodo de la ventana sería el día 304 día juliano para ambas, mientras que la ventana del mejor rendimiento abarcaría 30 y 20 días después para condición. Respecto al año agrícola caliente (c) que corresponde al ciclo OI 23-24 el comportamiento del rendimiento para las condiciones 4A y 3A fue muy similar la tendencia, para ambas inicia el día 304 juliano y a partir del día juliano 323 el rendimiento empieza a caer. Para la condición de 2A la mejor fecha de siembra mediante estas condiciones sería del 304 al 313 día juliano, teniendo como ventana 10 días.



a) Neutro



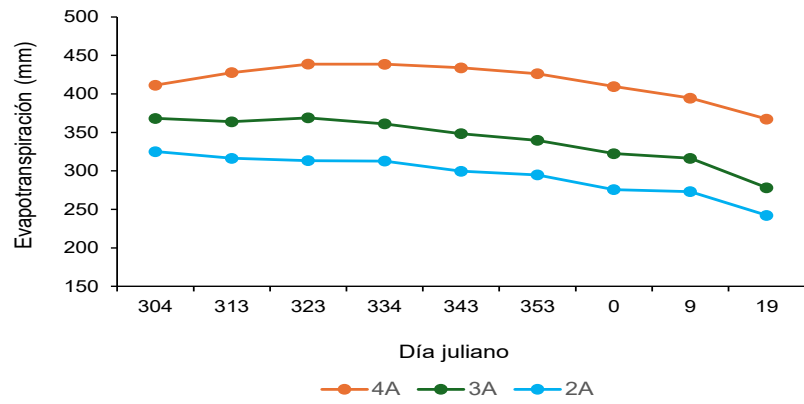
b) Frio



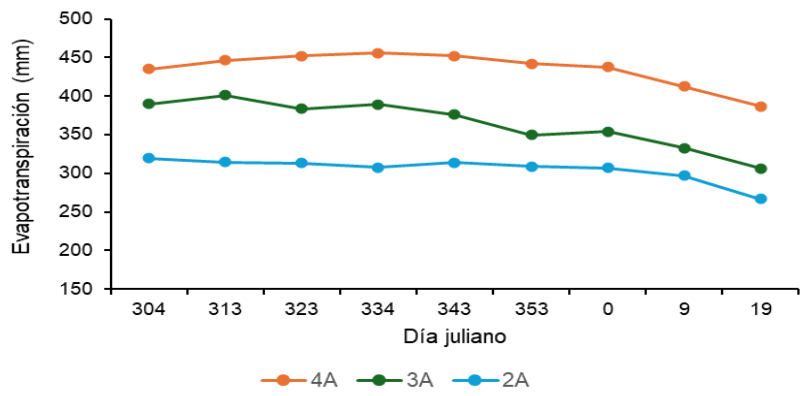
c) Caliente

Figura 16. Rendimiento simulado del cultivo de maíz en suelo arcilloso, para un ciclo neutro (a), frio (b) y caliente (c) y tres condiciones de riego: 4 auxilios (4A), 3 auxilios(3A) y 2 auxilios(2A).

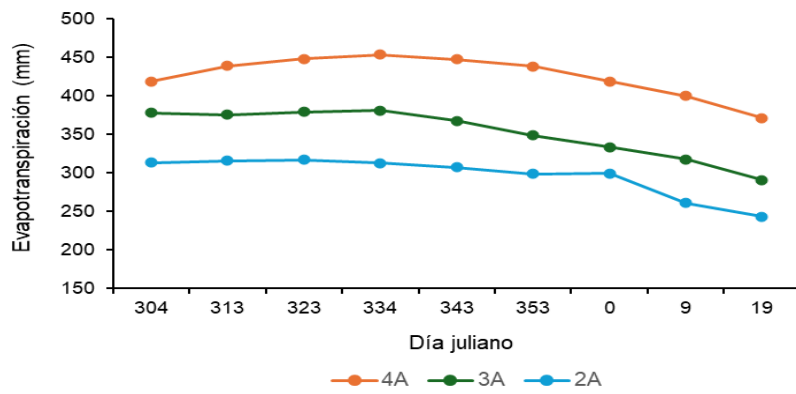
La Figura 17 indica la evapotranspiración donde la condición de riego de 4 auxilios(4A), se comportó muy similar en los 3 tipos de ciclos agrícola, a partir del día juliano 304 hasta llegar al 363 fue mayor, por otra parte, las condiciones 3 y 2 riegos de auxilios se comportaron muy similar, mientras que en las fechas de siembra desde el día juliano 304 hasta el 0, fue mayor y se mantuvo constante.



a) Neutro



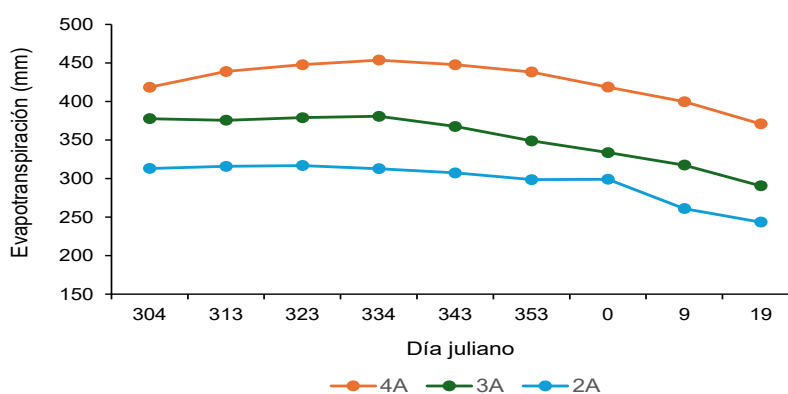
b) Frio



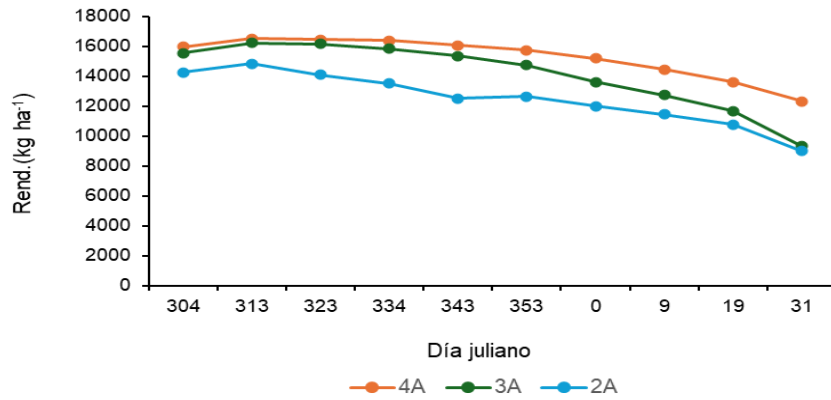
c) Caliente

Figura 17. Evapotranspiración simulada del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con tres tipos de ciclos OI (neutro, frío y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4A), 3 auxilios(3A) y 2 auxilios (2A)).

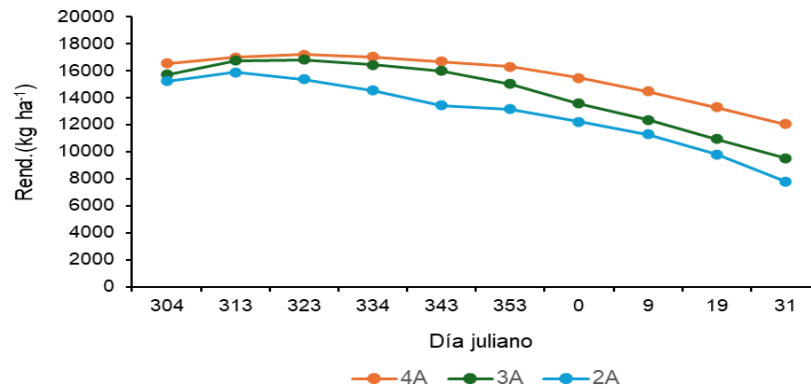
Para un suelo franco arcillo el comportamiento del rendimiento se comporta distinto bajo las mis condiciones mencionadas anteriormente tal como lo muestra la Figura 18, donde un ciclo neutro (a) la mejor ventana de siembra para las condiciones de riego 4A y 3A empieza a partir del día juliano 304 y a partir del día 353 empieza reducirse el rendimiento, mientras que la condición de 2A el periodo recomendado seria del 323 hasta el 343 día juliano. Para un ciclo OI frío(b) la ventana de siembra es muy amplia para las 3 condiciones abarcando 50 días, que va desde el día juliano 304 al 353, por último, para un ciclo OI caliente(c), el comportamiento para las condiciones de 4 y 3 auxilios es muy similar teniendo como periodo 50 días de siembra que va desde el día juliano 304 hasta el 353, para la condición de 2 auxilios abarca desde el día 304 hasta 334.



a) Neutro



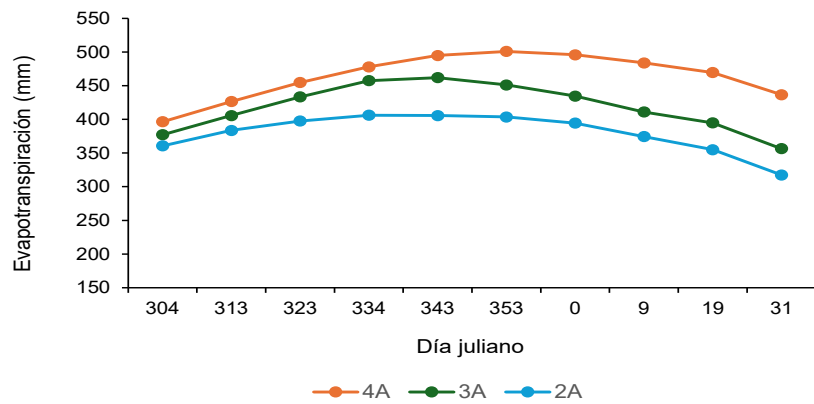
b) Frio



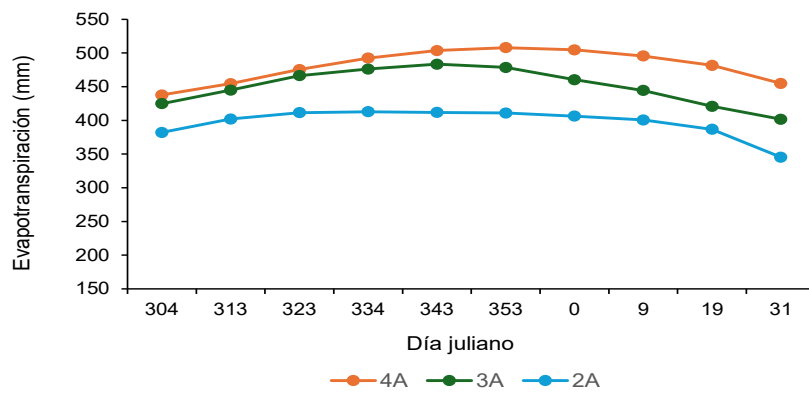
c) Caliente

Figura 18. Rendimiento simulado del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con tres tipos de ciclos OI (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4A), 3 auxilios(3A) y 2 auxilios (2A)).

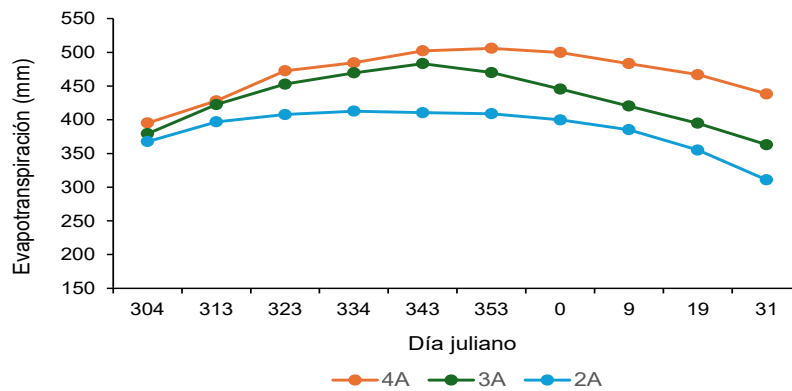
La Figura 19 indica evapotranspiración del cultivo simulada de un suelo franco arcilloso, donde las tres condiciones de riego (4A,3A y 2A) se comportaron similar en los tres tipos de año (neutro, frio y caliente) obtenido los valores más altos entre el periodo del día juliano 323 hasta el día juliano 9.



a) Neutro



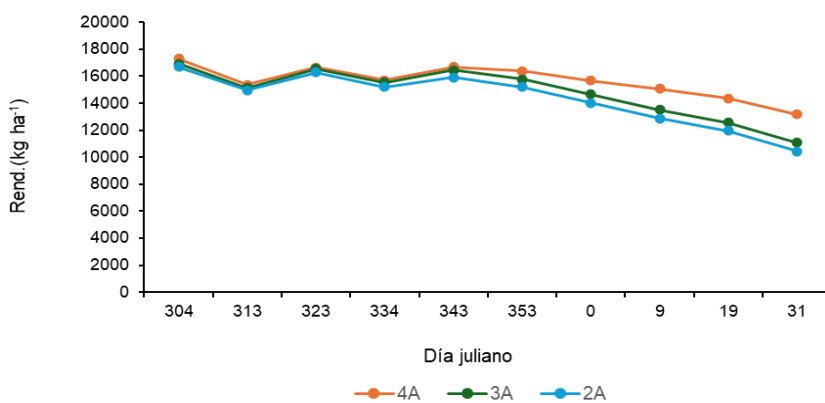
b) Frio



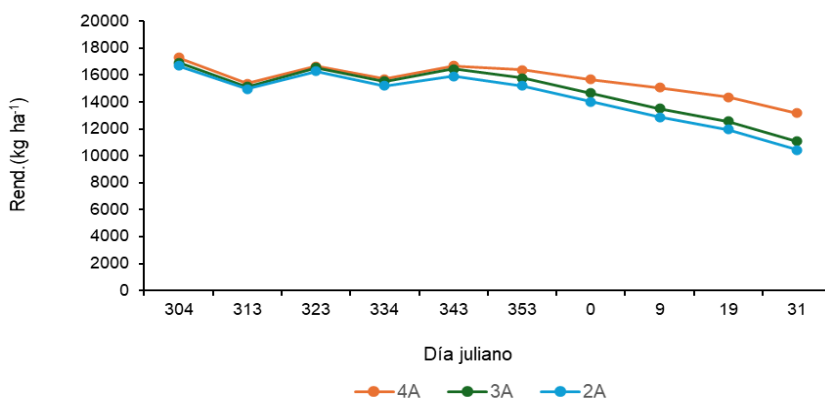
c) Caliente

Figura 19. Evapotranspiración simulada del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con tres tipos de ciclos OI (neutro, frío y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4A), 3 auxilios(3A) y 2 auxilios (2A)).

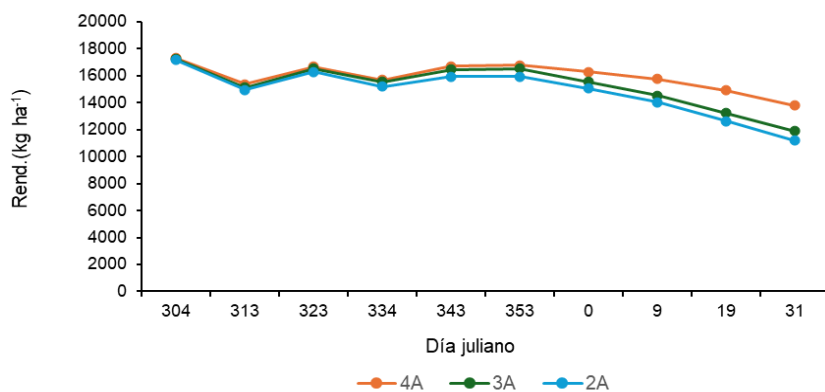
La Figura 20 indica el rendimiento simulado con un suelo franco limoso, donde en un año neutro las mejores fechas de siembra para las 3 condiciones de riego coinciden que va desde el día juliano 304 al 353, mientras que para un año frío la ventana de siembra es más amplia abarcando 50 días, iniciando el día juliano 304 y llegando hasta el día 353, por ultimo para el año caliente, las fechas coinciden todas las condiciones, abarcando desde el día juliano 304 al 353, a partir de esta fecha el rendimiento tiende a bajar.



a) Neutro



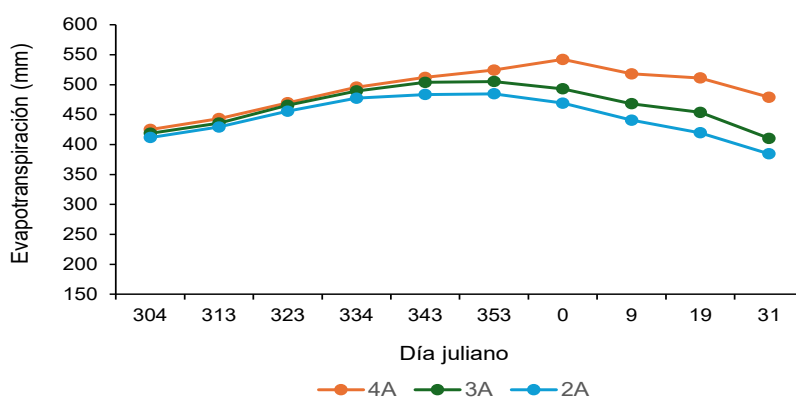
b) Frío



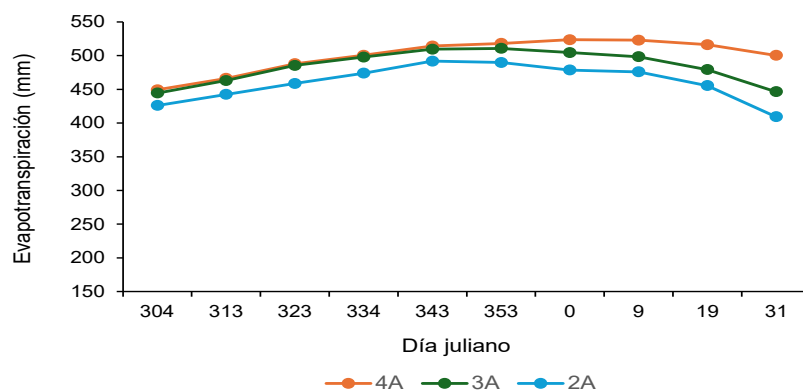
c) Caliente

Figura 20. Rendimiento simulado del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con tres tipos de ciclos Ol (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4A), 3 auxilios(3A) y 2 auxilios(2A)).

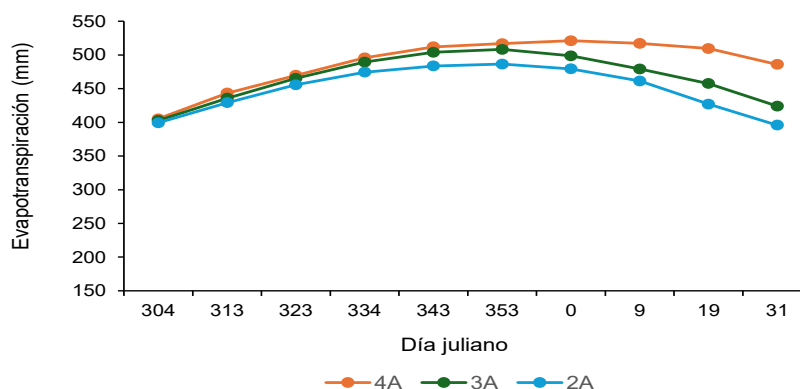
La Figura 21 indica la evapotranspiración, donde la textura del suelo es franco limoso, donde los comportamientos para las tres condiciones de riego fueron muy similares, obteniéndose valores menores en el año neutro y valores más altos en el año frío, las fechas de siembra con mayores valores se presentaron en los días julianos 343, 353, y 0.



a) Neutro



b) Frio



c) Caliente

Figura 21. Evapotranspiración simulada del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con tres tipos de ciclos OI (neutro, frio y caliente) con tres condiciones de riego (4 auxilios (4A), 3 auxilios(3A) y 2 auxilios (2A)).

6.3.1 Recomendaciones para la planeación del riego en escenarios climáticos y edáficos

6.3.1.1 Disponibilidad hídrica normal

El Cuadro 7 indica el rendimiento simulado en el periodo de siembra óptimo, para ciclos los cuales neutro (2021-2022), frio (2022-2023) y caliente (2023-2024), con disponibilidad hídrica normal que consistió en cuatro riegos de auxilio y un riego presiembra para llegar a capacidad de campo tal como lo muestra el Cuadro 6,

además de la disponibilidad hídrica se simuló con tres tipos de suelo (arcilloso, franco arcilloso y franco limoso), estos dos últimos fueron precargados por default del programa AquaCrop 7.1

Cuadro 6. Riego para la planeación de fecha de siembra optima en disponibilidad hídrica normal.

Número de riego	Lamina neta (mm)	Etapas
1	150	Presiembra
2	109	V8
3	118	VT
4	125	R1
5	152	R3
Total: 654		

La ventana de siembra para los ciclos OI neutro y caliente que se muestra en el Cuadro 7, se comporta mejor a partir del primero de noviembre, mientras que para el ciclo OI frio el periodo tiende a ser más amplio teniendo fecha optimas en algunos casos hasta el primero de noviembre y 10 de enero, con respecto al mejor rendimiento se presentó en los suelos arcillosos, para los suelos franco arcillosos se presentó en el año caliente, mientras que para el franco limoso se comportaron muy similares.

Cuadro 7. Recomendaciones para la planeación de fecha de siembra optima en tres tipos de textura y tres tipos de ciclos agrícolas OI.

Textura del suelo	Tipo de ciclo térmico OI	Periodo de siembra recomendado	Rendimiento esperado (kg ha ⁻¹)
Arcillosa	Neutro	1° de nov al 10 de dic	13,688
Arcillosa	Frio	1° nov de oct al 20 de dic	14,458
Arcillosa	Caliente	1° de nov al 20 de dic	15,245
Franco arcillosa	Neutro	1° de nov al 1° de ene	15,228
Franco arcillosa	Frio	1° de nov al 10 de ene	15,771
Franco arcillosa	Caliente	1° de nov al 1° de ene	16,608
Franco limosa	Neutro	1° de nov al 10 de dic	16,128
Franco limosa	Frio	1° de nov al 20 de dic	16,665

6.3.1.2 Disponibilidad hídrica restringida a tres riegos de auxilios (sequía)

Esta condición consistió en la aplicación de un riego presiembra y de tres riegos de auxilio como lo muestra el Cuadro 8, los riegos de auxilio fueron aplicados con base en etapas fenológicas del cultivo.

Cuadro 8. Riego para la planeación de fecha de siembra optima en disponibilidad hídrica restringida.

Número de riego	Lamina neta (mm)	Etapas
1	150	Presiembra
2	128	V8
3	167	VT
4	152	R1
Total: 597		

El Cuadro 9 muestra el rendimiento simulado durante el período de siembra óptimo para tres tipos de ciclos agrícolas OI, neutro (2021–2022), frío (2022–2023) y caliente (2023–2024), además se consideraron tres tipos de suelo, arcilloso, franco arcilloso y franco limoso. Cabe mencionar que los suelos franco arcilloso y franco limoso fueron precargados por en el programa AquaCrop 7.1. Donde los periodos de siembra más amplios se presentan en los ciclos OI fríos, mientras que para los ciclos OI neutros el periodo se acorta; para los suelos arcillosos los años fríos y calientes mostraron mejores rendimientos, mientras que para los suelos franco arcilloso y francos limosos se mantuvieron semejantes.

Cuadro 9. Recomendaciones para la planeación del suelo en tres tipos de textura y tres tipos de ciclos agrícolas OI.

Textura del suelo	Tipo de ciclo térmico OI	Periodo de siembra recomendado	Rendimiento esperado (kg ha ⁻¹)
Arcillosa	Neutro	1° de nov al 20 de nov	11,910
Arcillosa	Frio	1° de nov al 20 de dic	12,977
Arcillosa	Caliente	1° de nov al 1 de dic	13,574

Franco arcillosa	Neutro	20 de nov al 10 de dic	14,082
Franco arcillosa	Frio	1° de nov al 20 de dic	15627
Franco arcillosa	Caliente	1° de nov al 10 de dic	16128
Franco limosa	Neutro	1° de nov al 20 de dic	16064
Franco limosa	Frio	20 de oct al 20 de dic	16653
Franco limosa	Caliente	1° de nov al 20 de dic	16147

6.3.1.3 Disponibilidad hídrica restringida con dos riegos de auxilios (sequía)

La simulación se realizó bajo una condición de disponibilidad hídrica de sequía, que incluyó la aplicación de un riego presiembra y de dos riegos de auxilio en etapas clave del desarrollo del cultivo tal como lo muestra el Cuadro 10.

Cuadro 10. Riego para la planeación de fecha de siembra optima en disponibilidad hídrica restringida.

Número de riego	Lamina neta (mm)	Etapas
1	150	Presiembra
2	138	VT
3	157	R2
Total: 445		

El Cuadro 11 presenta los rendimientos simulados correspondientes al periodo de siembra óptimo, en tres condiciones climáticas distintas durante el ciclo agrícola OI: neutra (2021–2022), fría (2022–2023) y cálida (2023–2023). Se consideraron tres tipos de suelo: arcilloso, franco arcilloso y franco limoso, siendo estos dos últimos seleccionados como suelos precargados por defecto en el modelo AquaCrop versión 7.1., donde para un suelo arcilloso se comportó similar en lo que es el periodo de siembra teniendo entre 20 y 30 días de ventana, la mayor parte de concentra en empezar el primero de noviembre y culminar el veinte del mismo mes, los rendimientos para suelos francos arcillosos se mantuvieron mejor en año frio y caliente, mientras que para los franco limosos en los tres tipos de años el rendimiento se comportó similar.

Cuadro 11. Recomendaciones para la planeación del suelo en tres tipos de textura y tres tipos de ciclos agrícolas Ol.

Textura del suelo	Tipo de ciclo térmico Ol	Periodo de siembra recomendado	Rendimiento esperado (kg ha ⁻¹)
Arcillosa	Neutro	1° de nov al 20 de nov	10,567
Arcillosa	Frio	1° de nov al 10 de nov	10568
Arcillosa	Caliente	1° de nov al 20 de nov	11,410
Franco arcillosa	Neutro	1° de nov al 20 de dic	12,737
Franco arcillosa	Frio	1° de nov al 20 de dic	14,119
Franco arcillosa	Caliente	1° de nov al 1° de dic	14,202
Franco limosa	Neutro	1° de nov al 20 de dic	15293
Franco limosa	Frio	1° de nov al 1° de dic	15782
Franco limosa	Caliente	1° de nov al 20 de dic	15222

VII. CONCLUSIONES

El modelo AquaCrop, calibrado y validado para el cultivo de maíz bajo distintas condiciones hídricas, demostró ser una herramienta eficiente para evaluar el impacto del estrés hídrico sobre el rendimiento. Los resultados evidencian que el maíz es altamente sensible a la disponibilidad de agua, especialmente durante etapas críticas como la floración y el llenado de grano.

Se trabajaron dos escenarios de disponibilidad hídrica, condiciones normales y situación de sequía. Para ambos casos, se utilizaron simulaciones con AquaCrop, tomando en cuenta situaciones que permitieron representar de forma adecuada la variabilidad agroclimática y edáfica del área de estudio, generando estimaciones diferenciadas de rendimiento que reflejan las condiciones hídricas y agronómicas particulares.

El modelo permitió identificar que, en escenarios de déficit hídrico, es posible mantener rendimientos aceptables mediante una gestión eficiente del riego y una selección adecuada del periodo de siembra en función de la disponibilidad de agua. Además, AquaCrop mostró una buena capacidad predictiva, lo que permite simular estrategias de manejo hídrico para optimizar el uso del recurso sin comprometer significativamente la producción.

Por tanto, AquaCrop se consolida como una herramienta confiable para la toma de decisiones agronómicas, ya que permite evaluar múltiples escenarios sin necesidad de realizar ensayos de campo, reduciendo así tiempo y costos. En cuanto al proceso de calibración, uno de los parámetros más sensibles es la conductividad hidráulica del suelo, por lo que se recomienda determinar este valor mediante métodos de campo para mejorar la precisión del modelo.

VIII. LITERATURA CITADA

Abed El Baki, A., Jnad, I., Naaman, M., Raes, d. (2018). Evaluación del rendimiento de los cultivos acuáticos en la simulación de la producción de cultivos de trigo y maíz en Egipto. Revista Egipcia De Investigación Agrícola , 96(3), 1019-1038. Doi: 10.21608/ejar.2018.139181

Alcantar, G. G., Trejo, T. L., y Gomez, M. F. (2016). Nutricion de Cultivos. Estado de Mexico: Colegio de Postgraduados.

ASERCA. (23 de AGOSTO de 2018). Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. Obtenido de <https://www.gob.mx/aserca/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico>

Batista, P. D., y Dámaso, R. (2016). Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. Cultivos Tropicales, 37(3), 22-41.

CONAGUA. (23 de AGOSTO de 2018). Comisión Nacional del Agua. Categorías de sequia.<https://smn.conagua.gob.mx/es/categorias-de-sequia>

Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. Irrig. and Drainage Paper no. 33. FAO, Rome.

De Souza, J. L. M., Grabarski, F. A. P., dos Santos, A. A., Rosa, S. L. K., & Pauletti, V. (2021). Estimated dry biomass for summer crops in the subtropical zone in Southern Brazil. IDESIA (Chile), 39(3), 49-60.

FAO.Organizacion De Las Naciones Unidas Para La Alimentacion Y La Agricultura. (2018).El maiz en la alimentación humana . <https://www.fao.org/4/t0395s/T0395S02.htm>

FAO (22 de MARZO de 2019). Organizacion De Las Naciones Unidas Para La Alimentacion Y La Agricultura. Obtenido de El acceso al agua potable para toda la población es esencial para el desarrollo sostenible.

Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, 47 (4), 347-359.

González-Robaina, F., Delgado-Acosta, R., Díaz-Pérez, Y., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., y Cid-Lazo, G. (2018). Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. *Ingeniería Agrícola*, 8(1).

Hassan, D. F., Ati, A. S., & Neima, A. S. (2021). Calibration and evaluation of aquacrop for maize (*Zea Mays* L.) under different irrigation and cultivation methods. *Journal of Ecological Engineering*, 22(10), 192-204.

Iglesias, Y. C., Robaina, F. G., Granda, G. H., Rivero, L. H., & Zayas, E. C. (2020). Impacto del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*, 10(1), 49-60.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Superficie del estado de Sinaloa: 57,365.4 km², equivalente al 2.9 % de la superficie nacional [Datos geográficos]. Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020. México: INEGI.

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C*. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:10.1017/9781009157940.008.

Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 197-211.

Karasu, A., Kuşcu, H., Mehmet, Ö. Z., y Bayram, G. (2015). The effect of different irrigation water levels on grain yield, yield components and some quality parameters of silage Maize (*Zea mays indentata* Sturt.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(1), 138-145.

Melo-Sabogal, D. V., Contreras-Medina, L. M., y Romero-Zepeda, H. (2024). CAPÍTULO 13. La crisis del agua y su uso en la agricultura. In Bioética y diálogo de saberes.. Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO.

Olivera, N. T., Manrique, O. B., Masjuan, Y. G., Alega, A. M. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 25(3). 23-30p.

Pawar, G., KALE, M., y Lokhande, J. (2017). Response of AquaCrop Model to Different Irrigation Schedules. Agric Res, 73-81.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, TC y Fereres, E. (2009). AquaCrop: el modelo de cultivo de la FAO para simular la respuesta del rendimiento al agua: II. Algoritmos principales y descripción del software. Agronomy Journal , 101 (3), 438-447.

Ramos Cantillo, JA, y Becerra Vélez, E. (2016). Análisis de crecimiento y parametrización del modelo Aquacrop para un cultivo comercial de maíz tecnificado en condiciones de la altillanura colombiana.

SIAP. (14 de julio de 2024). Servicio de Informacion Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/

Sifuentes-Ibarra E., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E. y Cohen, I. S. (2020). Improving the monitoring of corn phenology in large agricultural areas using remote sensing data series. Spanish journal of agricultural research, 18(3), 23.

SMN. (AGOSTO de 2024).Servicio Meterologico Nacional. Monitor de Sequia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. y Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. y Fereres, E. 2009. AquaCrop: The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agronomy Journal, 101: 426–437

Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., y Ibáñez-Castillo, L. A. (2016). Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 105-122.

Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, TC, Fereres, E., Heng, LK, ... y Moreno, PM (2014). AquaCrop: Modelo de la FAO para la productividad hídrica y la respuesta al rendimiento de los cultivos. *Environmental Modelling & Software* , 62 , 351-360.

IX. ANEXOS

Anexo 8.1 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI neutro, con 4 riegos de auxilios y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	385	29,588	14,498
10-nov-21	313	175	411.3	30,091	13,110
20-nov-21	323	174	427.7	29,909	14,193
01-dic-21	334	174	438.7	29,027	13,183
10-dic-21	343	172	438.6	27,462	13,456
20-dic-21	353	168	433.9	25,725	12,605
01-ene-22	0	163	426.2	23,836	11,680
10-ene-22	9	158	409.6	21,776	10,670
20-ene-22	19	154	394.5	19,757	9,681
01-feb-22	31	148	367.4	17,928	8,785

Anexo 8.2 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI neutro, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	349.8	25,468	12,479
10-nov-21	313	175	368.2	26,290	11,454
20-nov-21	323	174	363.9	24,914	11,797
01-dic-21	334	174	368.9	23,620	10,728
10-dic-21	343	172	361.1	21,219	10,397
20-dic-21	353	168	348.3	19,484	9,547
01-ene-22	0	163	339.7	17,580	8,614
10-ene-22	9	158	322.5	15,735	7,710
20-ene-22	19	154	316.4	14,674	7,190
01-feb-22	31	148	278.1	12,381	6,067

Anexo 8.3 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI neutro, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	313.7	22,905	11,223
10-nov-21	313	175	325	23,479	10,167
20-nov-21	323	174	316.3	22,022	10,310
01-dic-21	334	174	313.3	20,175	8,917

10-dic-21	343	172	312.7	18,729	8,209
20-dic-21	353	168	299.6	16,949	7,841
01-ene-22	0	163	294.8	15,288	7,338
10-ene-22	9	158	275.7	13,315	6,524
20-ene-22	19	154	273	12,818	6,281
01-feb-22	31	148	242.3	9,917	4,859

Anexo 8.4 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo OI frío, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	184	424.4	31,195	14,912
10-nov-22	313	186	435.3	31,188	15,282
20-nov-22	323	185	446.3	30,497	14,944
01-dic-22	334	182	452.1	29,754	14,579
10-dic-22	343	181	455.7	28,526	13,978
20-dic-22	353	177	451.9	27,289	13,373
01-ene-23	0	172	441.7	25,350	12,421
10-ene-23	9	166	437.7	24,204	11,860
20-ene-23	19	160	412.4	20,006	10,873
01-feb-23	31	152	387	19,520	9,565

Anexo 8.5 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI frío, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	184	381.1	27,817	13,297
10-nov-22	313	186	390	27,698	13,572
20-nov-22	323	185	401	26,804	13,134
01-dic-22	334	182	383.8	24,526	12,018
10-dic-22	343	181	389.1	23,385	11,459
20-dic-22	353	177	375.7	21,686	10,626
01-ene-23	0	172	349.7	19,396	9,610
10-ene-23	9	167	354.3	18,226	8,931
20-ene-23	19	162	332.4	16,180	7,928
01-feb-23	31	153	306.3	13,927	6,824

Anexo 8.6 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI frío, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	184	319.2	23,542	10,568
10-nov-22	313	186	319.5	22,663	9,734
20-nov-22	323	185	314.4	20,770	7,653
01-dic-22	334	182	313.1	19,834	7,729
10-dic-22	343	181	307.7	17,965	6,624
20-dic-22	353	177	313.8	17,592	7,085
01-ene-23	0	172	308.6	16,686	7,402
10-ene-23	9	167	306.6	15,731	7,079
20-ene-23	19	159	297	14,801	7,108
01-feb-23	31	152	266.5	12,180	5,668

Anexo8.7. Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI caliente, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	386.6	31,892	15,627
10-nov-23	313	180	418.6	32,802	16,073
20-nov-23	323	182	439.1	32,627	15,938
01-dic-23	334	180	447.9	31,373	15,373
10-dic-23	343	179	453.8	29,794	14,599
20-dic-23	353	174	447.8	28,290	13,862
01-ene-24	0	167	438.4	26,147	12,812
10-ene-24	9	161	418.7	23,825	11,674
20-ene-24	19	155	399.9	21,479	10,525
01-feb-24	31	149	371.1	18,913	9,267

Anexo 8.8 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola OI caliente, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	354.1	28,469	13,950
10-nov-23	313	180	377.8	29,081	14,250
20-nov-23	323	182	375.7	27,437	13,444
01-dic-23	334	180	379.1	25,820	12,652

10-dic-23	343	179	380.9	24,032	11,776
20-dic-23	353	174	367.7	22,360	10,956
01-ene-24	0	167	349	19,396	9,506
10-ene-24	9	161	333.7	17,597	8,622
20-ene-24	19	155	317.5	15,581	7,635
01-feb-24	31	149	290.6	13,562	6,645

Anexo 8.9 Simulación del cultivo de maíz en suelo arcilloso, con ciclo agrícola Ol caliente, con 2 riegos de auxilios y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	319.9	25,881	12,682
10-nov-23	313	180	313.2	24,568	11,509
20-nov-23	323	182	315.9	23,343	10,038
01-dic-23	334	180	317	21,477	9,339
10-dic-23	343	179	312.8	19,508	7,978
20-dic-23	353	174	307.4	18,522	8,136
01-ene-24	0	167	298.7	16,762	7,761
10-ene-24	9	161	299.1	15,892	7,787
20-ene-24	19	155	261.1	12,450	6,101
01-feb-24	31	149	243.5	10,616	5,202

Anexo 8.10 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola Ol neutro, con 4 riegos de auxilios y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
10-nov-21	313	175	426.5	32,759	14,272
20-nov-21	323	174	454.7	33,372	15,837
01-dic-21	334	174	477.9	33,226	15,090
10-dic-21	343	172	494.9	32,457	15,904
20-dic-21	353	168	500.8	31,462	15,416
01-ene-22	0	163	495.8	29,655	14,531
10-ene-22	9	158	483.8	27,850	13,646
20-ene-22	19	154	469.6	25,976	12,728
01-feb-22	31	148	436.6	23,580	11,554

Anexo 8.11 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con un ciclo agrícola OI neutro, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	377.2	29,223	13,637
10-nov-21	313	175	405.6	30,900	13,227
20-nov-21	323	174	433.3	31,613	14,948
01-dic-21	334	174	457.4	31,225	14,181
10-dic-21	343	172	462	30,096	14,747
20-dic-21	353	168	451.1	28,058	13,749
01-ene-22	0	163	434.5	25,462	12,476
10-ene-22	9	158	411	22,977	11,259
20-ene-22	19	154	394.8	21,180	10,378
01-feb-22	31	148	356.5	18,772	9,198

Anexo 8.12 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI neutro, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	360.6	27,910	12,870
10-nov-21	313	175	383.5	28,284	12,101
20-nov-21	323	174	397.6	29,270	13,281
01-dic-21	334	174	406.1	28,055	12,742
10-dic-21	343	172	405.6	26,734	13,100
20-dic-21	353	168	403.5	25,162	12,329
01-ene-22	0	163	394.4	22,983	11,262
10-ene-22	9	158	374.4	21,101	10,304
20-ene-22	19	154	354.9	19,420	9,516
01-feb-22	31	148	317.4	16,363	8,018

Anexo o 8.13 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI frio, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	188	437.7	33,396	15,964
10-nov-22	313	186	454.6	33,710	16,518
20-nov-22	323	185	475.5	33,564	16,447
01-dic-22	334	182	492.6	33,443	16,387

10-dic-22	343	181	503.7	32,744	16,045
20-dic-22	353	177	508	32,102	15,730
01-ene-23	0	172	504.8	30,829	15,196
10-ene-23	9	166	495.6	29,510	14,460
20-ene-23	19	160	481.7	27,781	13,613
01-feb-23	31	152	454.9	25,168	12,332

Anexo 8.14 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI frío, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	188	424.9	32,504	15,537
10-nov-22	313	186	445	33,094	16,216
20-nov-22	323	185	466.5	32,935	16,138
01-dic-22	334	182	476.2	32,334	15,844
10-dic-22	343	181	483.4	31,316	15,345
20-dic-22	353	177	478.7	30,069	14,734
01-ene-23	0	172	460.5	27,762	16,604
10-ene-23	9	166	444.4	26,006	12,743
20-ene-23	19	160	421	23,797	11,660
01-feb-23	31	152	401.7	19,014	9,317

Anexo 8.15 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI frío, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	188	382.2	28,801	14,244
10-nov-22	313	186	402	30,266	14,830
20-nov-22	323	185	411.5	29,268	14,104
01-dic-22	334	182	412.8	28,032	13,502
10-dic-22	343	181	411.8	26,593	12,499
20-dic-22	353	177	410.9	25,798	12,641
01-ene-23	0	172	406.3	24,495	12,003
10-ene-23	9	166	400.6	23,351	11,442
20-ene-23	19	160	386.8	21,961	10,761
01-feb-23	31	152	345.4	18,374	9,003

Anexo 8.16 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI caliente, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	395.2	33,789	16,554
10-nov-23	313	180	428.1	34,707	17,006
20-nov-23	323	182	472.6	35,107	17,202
01-dic-23	334	180	484.6	34,739	17,022
10-dic-23	343	179	502.2	34,065	16,692
20-dic-23	353	174	506.1	33,293	16,314
01-ene-24	0	167	499.9	31,565	15,467
10-ene-24	9	161	483.3	29,556	14,482
20-ene-24	19	155	466.9	27,158	13,307
01-feb-24	31	149	438.4	24,618	12,063

Anexo 8.17 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI caliente, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	379.3	32,094	15,726
10-nov-23	313	180	422.6	34,179	16,748
20-nov-23	323	182	452.9	34,353	16,833
01-dic-23	334	180	469.6	33,543	16,436
10-dic-23	343	179	483.3	32,630	15,989
20-dic-23	353	174	470.1	30,685	15,036
01-ene-24	0	167	445.7	27,687	13,567
10-ene-24	9	161	420.3	25,242	12,369
20-ene-24	19	155	394.9	22,317	10,935
01-feb-24	31	149	363	19,470	9,540

Anexo 8.18 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco arcilloso, con ciclo agrícola OI caliente, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	367.7	31,057	15,218
10-nov-23	313	180	397	32,424	15,888
20-nov-23	323	182	407.7	31,372	15,372

01-dic-23	334	180	412.8	29,652	14,529
10-dic-23	343	179	410.5	27,893	13,442
20-dic-23	353	174	408.9	26,853	13,158
01-ene-24	0	167	399.9	24,937	12,219
10-ene-24	9	161	385.2	23,060	11,300
20-ene-24	19	155	255.1	20,000	9,800
01-feb-24	31	149	310.8	15,885	7,784

Anexo 8.19 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI neutro, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	425.1	35,281	17,293
10-nov-21	313	175	443.3	35,277	15,369
20-nov-21	323	174	469.7	35,126	16,669
01-dic-21	334	174	495.7	34,574	15,702
10-dic-21	343	172	512.1	34,073	16,696
20-dic-21	353	169	524.4	33,436	16,384
01-ene-22	0	163	542.2	32,002	15,681
10-ene-22	9	158	518	30,725	15,055
20-ene-22	19	154	511.1	29,310	14,362
01-feb-22	31	148	479	26,970	13,166

Anexo 8.20 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI neutro, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	418.8	34,533	16,921
10-nov-21	313	175	435.8	34,740	15,135
20-nov-21	323	174	465.6	34,852	16,539
01-dic-21	334	174	489.5	34,246	15,554
10-dic-21	343	172	503.9	33,598	16,463
20-dic-21	353	169	505.2	32,188	15,772
01-ene-22	0	163	493	29,932	14,667
10-ene-22	9	158	468.1	27,563	13,506
20-ene-22	19	154	453.8	25,678	12,582
01-feb-22	31	148	410.4	22,623	11,085

Anexo 8.21 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI neutro, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-21	304	173	411.8	34,094	16,706
10-nov-21	313	175	429.2	34,339	14,960
20-nov-21	323	174	455.8	34,298	16,276
01-dic-21	334	174	477.4	33,462	15,197
10-dic-21	343	172	483.6	32,505	15,928
20-dic-21	353	169	484.7	31,026	15,203
01-ene-22	0	163	469.1	28,600	14,014
10-ene-22	9	158	440.8	26,279	12,877
20-ene-22	19	154	419.7	24,378	11,945
01-feb-22	31	148	384.4	21,282	10,428

Anexo 8.22 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI frío, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	188	449.4	34,954	16,709
10-nov-22	313	186	466.3	34,866	17,084
20-nov-22	323	184	488	34,640	16,974
01-dic-22	334	182	500.6	34,297	16,805
10-dic-22	343	181	514.3	33,676	16,501
20-dic-22	353	177	518.1	33,195	16,265
01-ene-23	0	172	523.7	32,535	15,942
10-ene-23	9	166	522.9	31,722	15,444
20-ene-23	19	160	516.3	30,543	14,966
01-feb-23	31	153	500.4	28,629	14,028

Anexo 8.23 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI frío, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	188	444.5	34,821	16,645
10-nov-22	313	186	463.1	34,797	17,051
20-nov-22	323	184	485.4	34,590	16,949
01-dic-22	334	182	497.8	34,244	16,779

10-dic-22	343	181	509.6	33,548	16,438
20-dic-22	353	177	510.7	32,805	16,074
01-ene-23	0	172	504.6	31,283	15,329
10-ene-23	9	166	498.4	30,075	14,737
20-ene-23	19	160	479.3	28,116	13,777
01-feb-23	31	153	446.5	24,950	12,225

Anexo 8.24 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola Ol frío, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-22	304	188	426	33,802	16,158
10-nov-22	313	186	442.4	33,546	16,438
20-nov-22	323	184	458.7	32,915	16,128
01-dic-22	334	182	474	32,776	16,060
10-dic-22	343	181	491.9	31,887	15,624
20-dic-22	353	177	489.8	31,586	15,477
01-ene-23	0	172	478.6	29,893	14,648
10-ene-23	9	166	475.9	28,796	14,110
20-ene-23	19	160	455.6	26,990	13,225
01-feb-23	31	153	409.4	23,499	11,515

Anexo 8.25 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola Ol caliente, con 4 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	405.3	35,309	17,302
10-nov-23	313	175	443.3	35,369	15,369
20-nov-23	323	174	469.7	35,126	16,669
01-dic-23	334	174	495.7	34,574	15,702
10-dic-23	343	172	512.1	34,073	16,696
20-dic-23	353	174	516.8	34,257	16,776
01-ene-24	0	167	521.1	33,256	16,295
10-ene-24	9	161	517.1	32,204	15,780
20-ene-24	19	155	509.6	20,453	14,922
01-feb-24	31	149	485.9	28,166	138,001

Anexo 8.26 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI caliente, con 3 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	402.7	35,177	17,237
10-nov-23	313	175	435.8	34,740	15,135
20-nov-23	323	174	465.4	34,852	16,539
01-dic-23	334	174	489.5	34,246	15,554
10-dic-23	343	172	503.9	33,598	16,463
20-dic-23	353	174	508.3	33,756	16,540
01-ene-24	0	167	498.6	31,750	15,558
10-ene-24	9	161	479.2	29,679	14,543
20-ene-24	19	155	457.6	27,028	13,249
01-feb-24	31	149	424.1	24,263	11,889

Anexo 8.27 Simulación del cultivo de maíz en suelo franco limoso, con ciclo agrícola OI caliente, con 2 riegos de auxilio y 10 fechas de siembra.

Fecha de siembra	Día juliano	Duración (días)	ET	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
01-nov-23	304	176	399.3	35,049	17,174
10-nov-23	313	175	429.2	34,339	14,960
20-nov-23	323	174	455.8	34,298	16,276
01-dic-23	334	174	474.4	33,462	15,197
10-dic-23	343	172	483.6	32,505	15,928
20-dic-23	353	174	486.4	32,497	15,924
01-ene-24	0	167	479.4	30,719	15,053
10-ene-24	9	161	461.4	28,680	14,053
20-ene-24	19	155	427	25,820	12,652
01-feb-24	31	149	395.8	22,838	11,190